

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Avaliação do potencial solar e análise de  
medidas de eficiência energética num edifício  
universitário**

Pedro Guedes Fortes Fonseca

**Dissertação**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

**2015**



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



# **Avaliação do potencial solar e análise de medidas de eficiência energética num edifício universitário**

Pedro Guedes Fortes Fonseca

**Dissertação**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Orientador: Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça (FCUL)

**2015**



*“Life is but a continuous process of energy conversion and transformation.”*

*World Energy Assessment 2000,  
Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*



## **Abstract**

The world building stock is dominated by existing buildings whose energy efficiency is below optimal. Analysis of the breakdown of the energy consumption of each building by end use is an essential tool to identify inefficiencies.

In this study the energy consumption of a university building is analysed using dynamic thermal simulation and existing energy consumption data. From these results an energy consumption split between lighting, HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) and others was obtained. This information was used to perform the building energy certification (Portuguese Energy Performance Regulation for Services and Commerce Buildings) and improvement measures were studied. The results showed that 39% of the final energy use is due to lighting, 36% for HVAC and 25% for other purposes. Based on Regulation the building is labelled as B- class. The energy optimization measures have a reduction potential of 40% in the final energy consumption.

Energy efficiency is not limited to reducing energy consumption. In urban environment, local photovoltaic energy production can maximize the use of solar energy and avoid energy losses that typically occur between production centres and consumer sites. Through a three-dimensional model of the university campus the feasibility of the installation of a photovoltaic system on the roof was studied for two university campus (in Portugal and Mozambique). For the Portuguese case, using the on-site consumption option, the photovoltaic system can supply 13% of the annual electricity consumption with a 13 year payback. For the current Mozambique energy price structure and system costs the predicted payback is more than 20 years.

**Keywords:** Dynamic Thermal Simulation; Energy Certification; EnergyPlus; Solar Photovoltaic; Self-consumption

## Resumo

O parque edificado é maioritariamente representado por edifícios existentes que por serem mais antigos e não estarem sujeitos a políticas de eficiência energética têm um elevado consumo de energia. A desagregação do consumo energético de cada edifício por uso final representa um instrumento essencial para identificar possíveis ineficiências.

Neste trabalho, analisou-se um edifício universitário através de um modelo de simulação dinâmica calibrado a partir das faturas de energia. Desses resultados obteve-se uma divisão de consumo de energia por iluminação, climatização e outros. A partir destes resultados o edifício foi certificado com base no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços e analisaram-se medidas de melhoria. Os resultados demonstraram que 39% da energia final é para iluminação, 36% para climatização e 25% para outros fins. Com base no regulamento o edifício inclui-se na classe B- e as medidas de melhoria apresentam um potencial de redução conjunto de 40% da energia final.

Por outro lado, a eficiência energética não se limita a uma diminuição de consumo de energia. Em meio urbano a produção de energia fotovoltaica localmente evita perdas de energia que ocorrem tipicamente entre os centros produtores e locais de consumo. Com recurso a um modelo tridimensional de um campus universitário foi estudada a viabilidade de um sistema fotovoltaico na cobertura para um campus universitário em Portugal e em Moçambique. Em Portugal, caso o sistema de autoconsumo seja adotado, o sistema fotovoltaico de 310 kWp poderá suprir 13% do consumo anual de energia elétrica com viabilidade financeira ao fim de 13 anos. Em Moçambique, devido ao custo de energia atual e aos custos de sistema o *payback* é superior a 20 anos.

**Palavras-chave:** Simulação Dinâmica; Certificação Energética; EnergyPlus; Solar Fotovoltaico; Autoconsumo





## **Agradecimentos**

Aos meus familiares por todo o acréscimo especialmente aos meus pais pela oportunidade.

À Melissa pelo apoio, carinho, paciência e disputa de ideias.

Ao Professor Guilherme, pela experiência multifacetada e pela orientação particular e eficaz.

Ao Grupo de Edifícios Nuno Mateus, Sara, Filipa, António e Nuno Martins pela paciência, sabedoria e ajuda.

Aos parceiros de trabalho Raquel, Francisco e Patrícia, pelas dúvidas existenciais intermináveis.

Aos meus amigos Sara, João, Daniel M., Daniel A. e Rodrigo pela discussão constante.

A todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho final e para o meu percurso académico.

# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Motivação.....	3
1.3	Estrutura do documento.....	3
2	Fluxos de energia em edifícios .....	4
2.1	Setor de serviços.....	4
2.2	Balanco Energético.....	4
2.3	Eficiência energética .....	6
2.4	Avaliação de desempenho energético .....	7
2.4.1	Simulação dinâmica .....	9
3	Integração de produção de energia fotovoltaica em edifícios .....	12
3.1	Setor fotovoltaico .....	12
3.2	Sistema fotovoltaico.....	13
3.3	Capacidade de instalação.....	15
3.4	Metodologias de dimensionamento.....	17
4	Enquadramento Legal.....	19
4.1	Sistema de Certificação energética (DL 118/2013 – P349-D) .....	19
4.2	Produção de Energia Distribuída (DL 153/2014).....	23
5	Metodologia.....	26
5.1	Análise de consumo de energia .....	26
5.2	Modelação energética.....	27
5.2.1	Condições reais e previstas.....	27
5.2.1	Condições de referência .....	31
5.3	Potencial fotovoltaico.....	32
5.4	Análise financeira.....	34
6	Análise de consumos energéticos de um edifício do campus ISCTE.....	36
6.1	Descrição do edifício.....	36

6.2	Calibração do modelo de simulação dinâmica e desagregação do consumo de energia .....	36
6.3	Consumo de energia em condições previstas e de referência.....	38
6.4	Indicador de eficiência energética e classe energética .....	38
6.5	Medidas Melhoria.....	39
6.5.1	Climatização .....	39
6.5.2	Iluminação .....	41
6.5.3	Sistema fotovoltaico .....	42
6.5.4	Resultados da aplicação das medidas de melhoria .....	43
7	Potencial Solar Fotovoltaico em meio universitário.....	44
7.1	Portugal .....	44
7.2	Moçambique.....	50
7.3	Comparação: Portugal e Moçambique .....	54
8	Conclusão .....	56
9	Referências .....	57
10	Anexos.....	61
10.1	Características da envolvente do edifício do campus ISCTE.....	61
10.1.1	Paredes Exteriores .....	61
10.1.2	Paredes Interiores .....	61
10.1.3	Pavimento e cobertura exteriores .....	63
10.1.4	Pavimento e cobertura interiores .....	64
10.2	Perdas do sistema fotovoltaico considerado.....	65
10.3	Configuração do sistema fotovoltaico (Portugal e Moçambique) .....	66

## Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo de energia final por setor de atividade a nível mundial (2010). .....	1
Figura 2 – Consumo final por fonte de energia no setor residencial e de serviços e comércio a nível mundial (IEA 2012).....	2
Figura 3 - Fluxos de energia presentes numa divisão.....	5
Figura 4 – Mecanismos de redução do consumo de energia (adaptado de Ma et al. 2012) .....	6
Figura 5 - Métodos de quantificação de energia para edifícios existentes Adaptado de (Wang et al. 2012) .....	8
Figura 6 – Etapas de simulação em <i>EnergyPlus</i> .....	10
Figura 7 – Potência anual instalada de tecnologia fotovoltaica.....	12
Figura 8 – Segmentação do mercado fotovoltaico no mercado europeu em 2013 .....	13
Figura 9 – Componentes de um sistema fotovoltaico com ligação à rede elétrica.....	14
Figura 10 - Informação necessária para estimar a produção de um sistema fotovoltaico .....	15
Figura 11 - Área disponível para implementação de fotovoltaico (Azul) .....	17
Figura 12 - Exemplo de um modelo e ambiente de trabalho do <i>Sketchup</i> e <i>Skelion</i> (Sketchup Skelion solar design Plugin n.d.).....	18
Figura 13 - Função dos indicadores usados na certificação energética.....	20
Figura 14 - Consumos de energia considerados ( <i>S</i> ) ou não ( <i>T</i> ) para cálculo da classe energética.....	20
Figura 15 - Tipos de IEE .....	21
Figura 16 - Processo de certificação por simulação dinâmica.....	22
Figura 17 - Intervalos de $R_{IEE}$ que determinam a classe de um edifício de comércio e serviços.....	22
Figura 18 - Características dos regimes de produção distribuída .....	23
Figura 19 - Metodologia utilizada para a análise de consumo de energia.....	27
Figura 20 - Planta exemplo original com marcação da tipologia dos espaços por cor.....	28
Figura 21 - Planta do modelo construído com divisão das zonas térmicas .....	28
Figura 22 - Divisão de zonas térmicas num dos pisos do edifício em estudo. Acima, a planta original colorida por tipologia de espaço, abaixo zonas térmicas consideradas no modelo de simulação .....	28
Figura 23 - Modelo geométrico.....	28
Figura 24 – Metodologia utilizada para avaliar o potencial solar fotovoltaico .....	32
Figura 25 – Complexo universitário do ISCTE-IUL (Bing Maps 2015) .....	36
Figura 26 - Comparação entre resultados simulados e reais .....	37
Figura 27 – Desagregação anual de consumos energéticos obtida por simulação .....	37
Figura 28 - Consumo Anual para condições previstas (esquerda) e de referência (direita) .....	38
Figura 29 - Classe Energética.....	39
Figura 30 - Distribuição do sistema de climatização e ventilação ( <i>Google Earth</i> ) .....	40

Figura 31 - Consumo anual sem aplicação da medida de melhoria (esquerda) e com aplicação da medida de melhoria (direita) .....	41
Figura 32 – Iluminação com FT8 em sanca no corredor (esquerda) e FT8 em sala de aula (direita) ...	41
Figura 33 - Sistema fotovoltaico na Ala Autónoma (área a azul – área disponível) .....	42
Figura 34 - Redução de consumo de energia pela aplicação das medidas de melhoria (energia anual)	43
Figura 35 - Área de cobertura disponível .....	45
Figura 36 - Área disponível para implementação de módulos .....	45
Figura 37 - Disposição de módulos com uma inclinação de 30° .....	46
Figura 38 - Comparação produção e consumo em semana de Janeiro (Edifício I, AA e INDEG) .....	47
Figura 39 - Comparação produção e consumo em semana de Agosto (Edifício I, AA e INDEG) .....	48
Figura 40 - Comparação produção fotovoltaica com consumo Edifício II .....	48
Figura 41 - Evolução financeira a 20 anos do sistema fotovoltaico .....	49
Figura 42 – Influência da compensação dos CIEG no VAL e <i>payback</i> .....	50
Figura 43 - Campus universitário em Moçambique .....	51
Figura 44 – Disposição do sistema fotovoltaico previsto .....	52
Figura 45 – Área disponível para instalação .....	52
Figura 46 - Desagregação de investimento para um sistema de 230 kWp [%] .....	53
Figura 47 - Evolução temporal do retorno de investimento .....	53
Figura 48 - Investimento do projeto fotovoltaico para Portugal (esquerda) e Moçambique (direita) ...	54
Figura 49 - Produção real e prevista para cantina 1 da UL .....	65
Figura 50 - Produção real e prevista para Jardim de Pedra da FCUL .....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Eficiência por tecnologia de fabrico (Cerón et al. 2013) .....	15
Tabela 2 - Valor associado à recuperação dos CIEG em 2015 (ERSE 2014) .....	24
Tabela 3 - Características de remuneração por regime de produção .....	25
Tabela 4 - Parâmetros usados para cálculo das cargas elétricas de climatização .....	29
Tabela 5 - Potência definidas para equipamentos elétricos .....	30
Tabela 6 - Horário de ocupação, iluminação e equipamento elétrico .....	30
Tabela 7 – Coeficientes de transmissão térmica para condições de referência segundo RECS .....	31
Tabela 8- Densidade de potência por tipologia .....	31
Tabela 9 - Valores de referência para a) eficiência equipamento de climatização b) caudal de ar novo .....	32
Tabela 10- Valor de inversores selecionados .....	33
Tabela 11 - Custos considerados para o sistema fotovoltaico .....	33
Tabela 12 - Indicadores de Eficiência Energética .....	39
Tabela 13 - Potência instalada por tecnologia .....	42
Tabela 14 - Classe Energética com aplicação de medidas de melhoria .....	43
Tabela 15 - Radiação Solar para Lisboa 38°N, 9°W, Elevação 88 m) (kWh/m <sup>2</sup> ) (JRC's Institute for Energy and Transport and European Commission n.d.) .....	44
Tabela 16 - Produção de energia renovável por edifício .....	46
Tabela 17 - Projeção de investimento por componente do sistema fotovoltaico .....	47
Tabela 18 - Remuneração/Poupança anual do sistema fotovoltaico .....	49
Tabela 19 - Avaliação dos custos de interesse económico geral na mais-valia anual do sistema fotovoltaico .....	50
Tabela 20 - Irradiação anual de Maputo (25°S, 32°E, Elevação: 74 m) por unidade de área [kWh/m <sup>2</sup> ] (JRC's Institute for Energy and Transport and European Commission n.d.) .....	51
Tabela 21 – Características do sistema por conjunto de edifícios .....	52
Tabela 22 - Comparação dos principais valores entre casos de estudo .....	54
Tabela 23 - Características das paredes exteriores da Ala Autónoma .....	61
Tabela 24 - Características do módulo utilizado .....	66
Tabela 25 - Caracterização do sistema fotovoltaico para o <i>campus</i> ISCTE em Portugal .....	66
Tabela 26 - Caracterização do sistema fotovoltaico para o <i>campus</i> em Moçambique .....	67

## **Lista de acrónimos e abreviaturas**

MTEP – Milhão de Tonelada Equivalente de Petróleo

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

IEA – *International Energy Agency*

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

BREEAM – *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

AQS – Águas Quentes Sanitárias

CIEG – Custos de Interesse Económico Geral

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

COP – *Coefficient of Performance*

EER – *Energy Efficiency Ratio*

DOE – *Department of Energy, United States Government*

OMIE – Operador do Mercado Ibérico de Energia

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

DAC CAD – Desenho Assistido por Computador

PV – *Photovoltaic*

PVGIS - *Photovoltaic Geographical Information System*

## **Nomenclatura**

$IEE_{pr,S}$  – Indicador de Eficiência Energética previsto

$IEE_{REN}$  – Indicador de Eficiência Energética renovável, associado à produção de energia elétrica e térmica por fontes de energia renováveis

$IEE_{ref,S}$  – Indicador de Eficiência Energética de referência

$kWh_{EP}$  – kilowatt-hora equivalente de petróleo

$R_{IEE}$  – Rácio de classe energética





# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

As cidades representam um foco de atividades sociais, culturais e económicas mas também são centros de elevado consumo energético. Ocupam cerca de 2% da superfície terrestres mas são responsáveis por 75% do consumo mundial de recursos (Madlener & Sunak 2011). A complexidade e o dinamismo destas atividades interagem com a natureza através do consumo de materiais, produtos e energia. A Agência Internacional de Energia (IEA) divide o consumo final de energia por setor de atividade (Figura 1), onde 35% da energia final serve o setor dos edifícios. Este é um dos setores que esta instituição considera desempenhar um papel significativo na redução do consumo de energia no futuro.

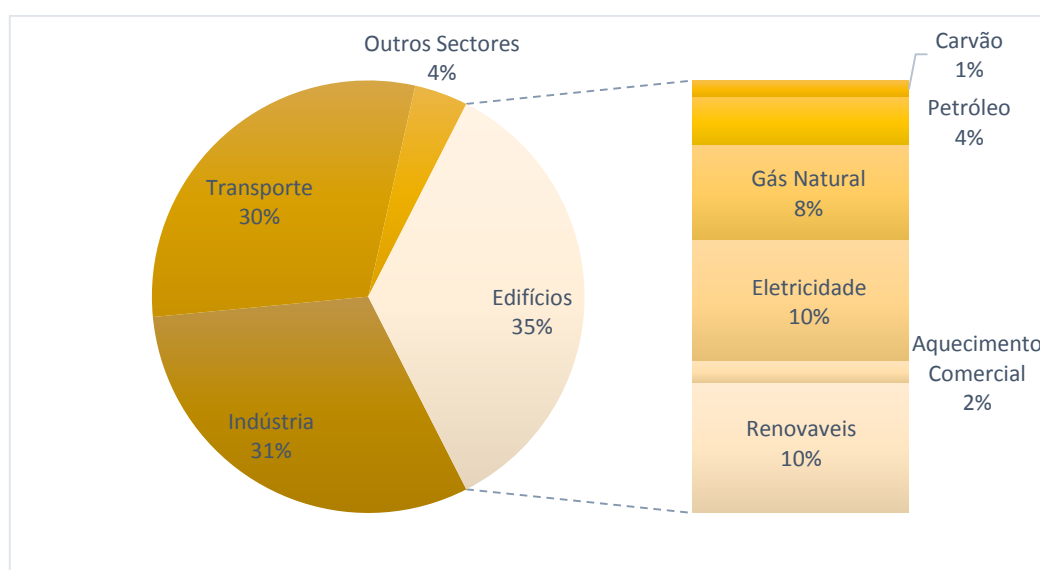


Figura 1 - Consumo de energia final por setor de atividade a nível mundial¹ (2010).

Adaptado de (IEA 2013)

A redução de energia no setor dos edifícios exige informação concreta devido à natureza interativa dos edifícios com os seus ocupantes. Uma vez que os edifícios integram espaços de trabalho, lazer e habitação introduzir mudanças influencia os processos de decisão dos seus utilizadores. Esta influência requer que seja feito um estudo prévio sobre o uso de energia nestas estruturas. Maioritariamente esta informação apresenta-se em falta em muitos dos edifícios existentes o que complica a avaliação de medidas de melhoria que podem ser implementadas e o seu impacto no ambiente interior. Este é um dos fatores que impossibilita atingir o total potencial de redução de consumo de energia deste setor.

<sup>1</sup> Todos os valores de percentagem se referem ao valor de energia final total

A eletrificação de processos no setor residencial e de serviços e comércio das últimas duas décadas fez com que o consumo de eletricidade apresentasse um forte crescimento (Figura 2). O aumento do consumo desta forma de energia evolui o conceito de eficiência energética não só para redução de consumo de energia mas também para a sua conjugação com produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

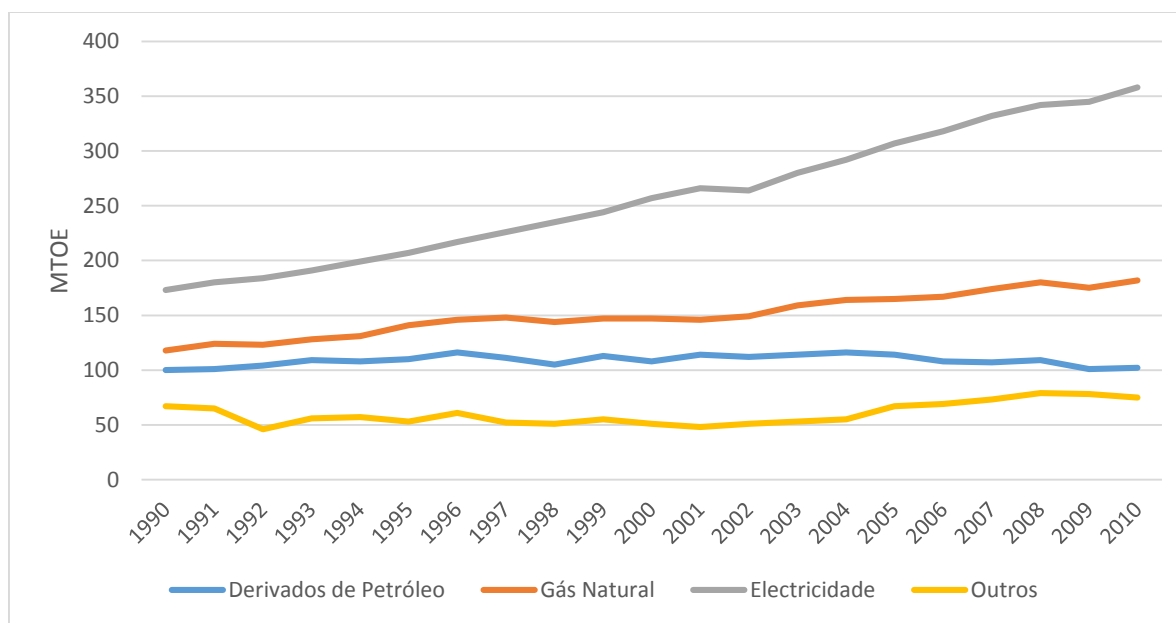


Figura 2 – Consumo final por fonte de energia no setor residencial e de serviços e comércio a nível mundial (IEA 2012)

Outros: Carvão, Biocombustíveis e resíduos, Geotermia e Calor

Paralelamente, o sistema elétrico encontra-se em mudança acentuada. A ideia tradicional de uma rede de transporte e distribuição hierarquizada começa a ser substituída pela fragmentação e integração de produção local crescendo o conceito de *prosumers* - ser ao mesmo tempo, produtor e consumidor de energia (Allan et al. 2015). Este conceito tem evoluído rapidamente e as políticas estão a ser adaptadas em vários países para permitir este novo formato. Políticas de *net-metering* (contabilização da energia que é produzida em excesso e vendida à rede durante um longo período de tempo – mensal ou anual, por exemplo) estão a ser consideradas mas questões como o impacto no negócio das grandes produtoras elétricas e a gestão de rede estão a ser levantadas. Outra forma de produção refere-se ao autoconsumo que tem vindo a ser imposto ou discutido em diferentes países (Masson 2014) (Green 2007).

A integração de tecnologia fotovoltaica em edifícios é uma solução para a produção de energia renovável em meio urbano que pode responder a esta inovação do sistema elétrico e ao crescente consumo de eletricidade. Apesar de adicionar novas qualidades estéticas, a produção de energia junto do ponto de utilização reduz o consumo e otimiza a gestão da rede elétrica. Além disso a tecnologia fotovoltaica é uma das tecnologias renováveis com crescimento mais acentuado no mundo (Branker et al. 2011). A exploração desta tecnologia tem sido feita em muitos países através de tarifas de incentivo e taxas de desconto ou esquemas legais que proporcionam poupanças económicas aos seus utilizadores.

## **1.2 Motivação**

A maioria dos edifícios tem um tempo de vida de várias décadas. A sua antiguidade induz que os edifícios já existentes não estejam sujeitos a políticas de eficiência energética traduzindo-se num elevado consumo de energia. O alto consumo de energia requer que sejam estudadas medidas de eficiência energética. No entanto, estes edifícios não possuem informação adequada para identificar possíveis focos de ineficiências. Portanto, importa aferir de que forma é usada essa energia através de metodologias e técnicas de simulação para analisar os resultados e perceber de que forma se pode melhorar o desempenho energético de um edifício existente.

Na perspetiva de futuro em que os edifícios serão energeticamente neutros (*ZEB – Zero Energy Buildings*) (Parlamento Europeu 2010), a produção local de energia através de fontes de energia renovável ganha relevância. Em meio urbano, a integração de energia fotovoltaica nas coberturas é uma das hipóteses de produzir energia localmente. Mas para o seu sucesso é importante determinar os ganhos energéticos e o impacto económico da instalação de um sistema produtor fotovoltaico.

Através de três casos de estudo, este trabalho pretende dar respostas às seguintes questões:

1. De que forma é utilizada a energia num edifício universitário?
2. Que medidas de racionalização permitem uma redução da fatura energética sem reduzir os níveis de conforto? Qual o potencial de redução de consumo de um grande edifício existente?
3. Qual a área disponível para aproveitamento de energia solar? Qual o custo e o *payback* de um sistema fotovoltaico?
4. De que forma é que os modelos de financiamento institucionais e regulamentos portugueses se aplicam e definem o sucesso da redução de consumos no parque edificado?

## **1.3 Estrutura do documento**

O trabalho está organizado em oito capítulos: o primeiro introduz o restante trabalho e aborda o que determinou a sua realização e os objetivos que pretende alcançar; o segundo inclui uma descrição dos fluxos de energia de um edifício e caracteriza o setor e as ferramentas de simulação necessários para uma correta avaliação do consumo energético; o terceiro apresenta uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias, incertezas e metodologias existentes para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico; o quarto enquadra a legislação portuguesa referente à avaliação energética e produção distribuída de energia; o quinto descreve a metodologia para a realização do trabalho; o sexto expõe os resultados de consumo energético e de medidas de eficiência energética referentes a um edifício universitário; o sétimo avalia o potencial solar fotovoltaico de um campus universitário aplicado a dois casos de estudo, um em Portugal e outro em Moçambique; e o oitavo apresenta as conclusões.

## **2 Fluxos de energia em edifícios**

### **2.1 Setor de serviços**

Os edifícios são agregados em setor residencial e não residencial. O setor não residencial, também apelidado de “comércio e serviços públicos” ou setor terciário, abrange diferentes atividades económicas desde privadas a públicas ou uma combinação das duas. As categorias divergem com escritórios, venda a retalho, administração pública, saúde, educação, armazéns, restauração, vendas, artes, entretenimento e recreio (OECD/IEA 2014). Devido a esta diversificação de tipologias, compreender o uso da energia no setor não residencial é um processo complexo uma vez que a utilização final, que abrange áreas como a iluminação, ventilação, aquecimento, arrefecimento, refrigeração e outros equipamentos elétricos, varia de forma drástica de edifício para edifício.

A diretiva europeia (2010/31/UE) refere que os edifícios utilizados por entidades públicas devem assumir um papel diferenciador e ser o exemplo de como aplicar medidas de eficiência que contribuam para a redução do consumo de energia no meio urbano em que se inserem (Parlamento Europeu 2010). Entidades públicas como estabelecimentos de ensino e de função pública apresentam-se como um dos focos de estudo de medidas para aumentar a sua eficiência energética.

Dentro do setor de serviços públicos, os edifícios de ensino apresentam uma importância particular na implementação de medidas de eficiência energética, uma vez que podem ser usados como meio de comunicação para a consciencialização de alunos e famílias atingindo diferentes camadas da sociedade. Do ponto de vista económico, o custo energético representa a segunda maior despesa destes serviços públicos, a seguir aos salários dos trabalhadores (Dias et al. 2014). Estes dois argumentos revelam a necessidade de avaliar os fluxos energéticos existentes e formas de aumentar a sua eficiência de consumo energético.

### **2.2 Balanço Energético**

O consumo energético de um edifício é influenciado por diversos fatores, como condições atmosféricas exteriores, tipo de construção (propriedades térmicas e físicas dos materiais), o perfil de ocupação, eficiência dos subsistemas como iluminação e AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e os horários de utilização (Zhao & Magoulès 2012).

As fontes e perdas de energia podem ser várias desde ganhos solares, ocupação interna, perdas por infiltração e condução e a energia para aquecimento e arrefecimento. Este balanço é traduzido em regime estacionário pela equação 1 e Figura 3.

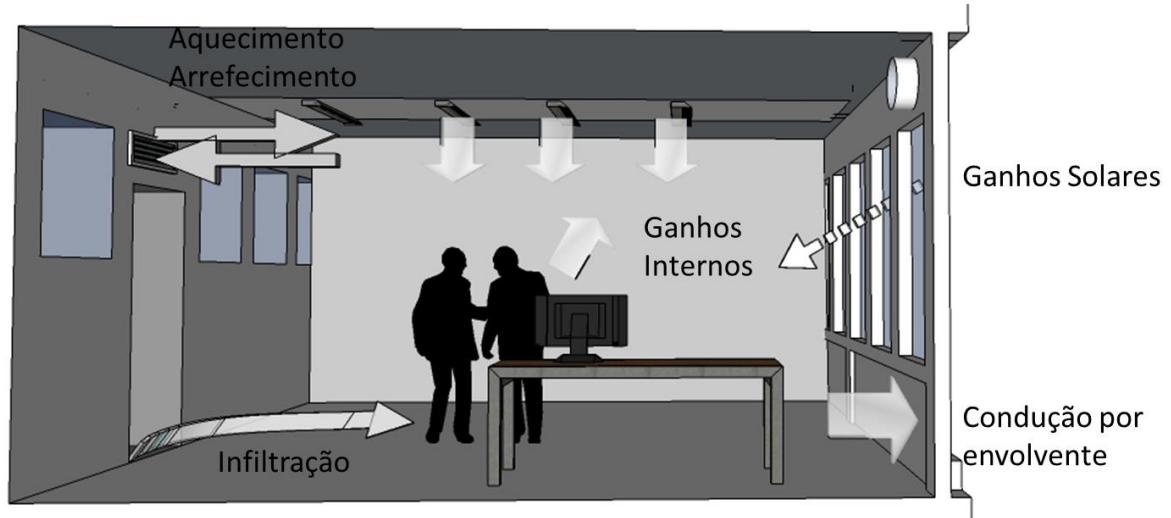


Figura 3 - Fluxos de energia presentes numa divisão

$$G_i + G_s + G_v + G_c = E_{ar} + TE_{sup} \quad [1]$$

Os ganhos internos ( $G_i$ ) de um edifício são devidos à ocupação, equipamento e iluminação. Os ganhos solares ( $G_s$ ) derivam da incidência direta ou indireta de radiação solar nas superfícies não opacas (equação 2). Os ganhos de ventilação ( $G_v$ ) referem-se aos ganhos energéticos devido à entrada de ar exterior por ventilação ou infiltração (equação 3). Os ganhos de climatização ( $G_c$ ) representam a energia que o ar aquecido ou arrefecido por meios mecânicos fornece ao espaço (equação 4). Existe também a energia no ar interior ( $E_{ar}$ ) do espaço (equação 5) e ainda energia transferida pela sua envolvente ( $TE_{sup}$ ) (equação 6).

Os ganhos solares são calculados por:

$$G_s = A_v \cdot F_s \cdot (I_{direta} \cdot \cos(altitude) \cdot \cos(azimute) + I_{difusa}) \quad [2]$$

Onde,  $A_v$ , área de superfície não opaca ( $m^2$ ),  $F_s$ , fator solar (adimensional),  $I_{direta}$ , radiação direta ( $W/m^2$ ),  $altitude$  ( $^\circ$ ),  $azimute$  ( $^\circ$ ),  $I_{difusa}$ , radiação difusa ( $W/m^2$ ).

Os ganhos de ventilação, climatização, energia no ar interior e transferida pela envolvente são calculados por:

$$G_v = \rho \cdot C_p \cdot \dot{V} (T_{ext} - T_{int}) \quad [3]$$

$$G_c = \rho \cdot C_p \cdot \dot{V} (T_{ins} - T_{int}) \quad [4]$$

$$E_{ar} = \rho \cdot C_p \cdot V_s \cdot \frac{(T_{ins} - T_{int})}{\partial t} \quad [5]$$

$$TE_{sup} = \sum_{n=1}^k (T_{int} - T_{ext}) \cdot A_n \cdot U_n \quad [6]$$

Onde:  $\rho$ , massa volúmica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_p$ , calor específico do fluido ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),  $\dot{V}$ , caudal volúmico de ventilação ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $T_{ext}$ , temperatura do ar exterior ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{int}$ , temperatura do ar interior ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{ins}$ , temperatura do ar insuflado pelo sistema de climatização no interior do espaço,  $\partial t$ , variação temporal,  $V_s$ , volume do fluido ( $\text{m}^3$ ),  $A_n$ , área da superfície n ( $\text{m}^2$ ),  $U_n$ , coeficiente de transmissão térmica da superfície n ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

Esta avaliação permite estudar as trocas de calor que existem em simultâneo, a influência dos ganhos solares no balanço energético final, as necessidades térmicas, dimensionar os sistemas de climatização ou a suficiência de soluções passivas.

### 2.3 Eficiência energética

A Agência Internacional de Energia define eficiência energética como “*um modo de gerir e restringir o aumento do consumo energético*”, defendendo que a sua aplicação é uma ferramenta importante para atingir a sustentabilidade do futuro energético com reduções nos custos de infraestruturas, reduções de tarifas, aumento de competitividade e do bem-estar dos consumidores. Esta gestão e restrição do consumo energético pode ser alcançada por três vetores (Ma et al. 2012):

- Redução do consumo final;
- Produção local de energia;
- Mudanças nos padrões de consumo energético.

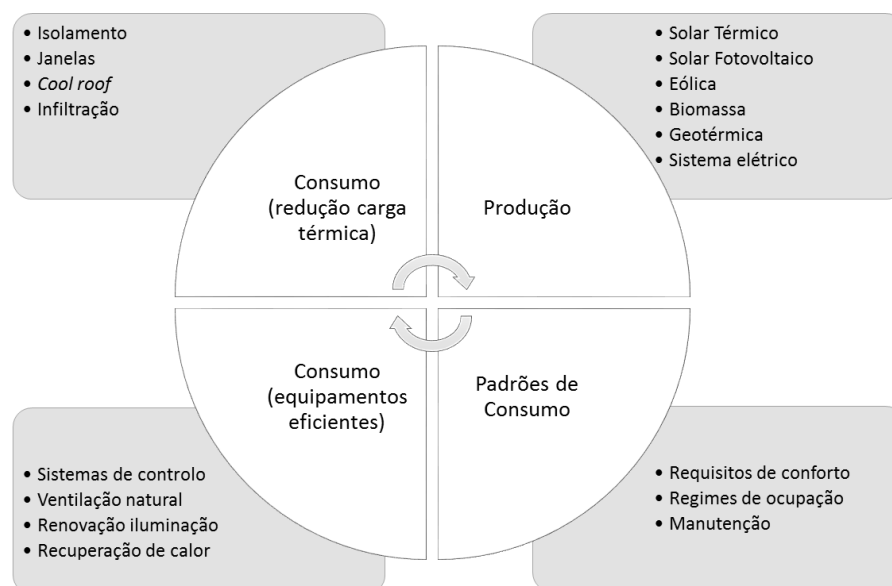


Figura 4 – Mecanismos de redução do consumo de energia (adaptado de Ma et al. 2012)

As ferramentas para um aumento da eficiência energética podem ir desde o uso de um equipamento mais eficiente, modificação da envolvente do edifício, concretamente revestimentos de paredes, tetos e chão, ou através de métodos mais avançados como controlo da infiltração dos espaços e janelas de sombreamento. Existem igualmente processos de baixo consumo de energia que podem incluir esquemas de controlo avançado, ventilação natural, recuperação de calor e sistemas de armazenamento térmico. Aumentar o desempenho energético pode passar, igualmente, pela renovação do sistema elétrico e o uso de sistemas de produção de energia renovável que proporcionem uma fonte alternativa para o fornecimento de eletricidade ou energia térmica ao edifício, como energia solar térmica, fotovoltaica, eólica, geotermia entre outros.

No entanto, segundo Karmellos e a sua equipa (Karmellos et al. 2015), a escolha do tipo de medida a aplicar deve ser considerada segundo alguns instrumentos de decisão como:

- Ambientais: necessidades energéticas, consumos de energia primária, emissões de CO<sub>2</sub>, outras avaliações ambientais;
- Económicos: custos de capital, custos ao longo do seu ciclo de vida;
- Sociais: conforto térmico e acústico, bons níveis de iluminação natural e qualidade do ar interior;
- Técnicos: tempo de vida útil, por exemplo.

Cada edifício apresenta diferentes características, pelo que as medidas de poupança usadas para um edifício podem não ser adequadas a outro. Além disso, a implementação de múltiplas medidas de poupança energética não se conjuga no somatório dos benefícios que cada uma proporciona em particular devido à natureza interativa presente entre os sistemas de energia de um edifício, pelo que a sua implementação deve ser estudada caso a caso.

## **2.4 Avaliação de desempenho energético**

A avaliação de desempenho de um edifício é essencial para determinar a eficiência do uso de energia e é a base para avaliar medidas de eficiência energética a implementar. Para avaliar o desempenho energético é necessário quantificar os diferentes tipos de consumo de energia num edifício. São fontes comuns de quantificação o uso de informação relacionada com contas de energia, auditoria ao edifício, monitorização do uso final de energia e simulação computacional.

Os métodos para quantificação de energia estão divididos em três categorias: previsão, medição ou híbridos. A previsão refere-se a métodos de quantificação de energia com base em cálculos que podem ser dinâmicos (obtidos através de ferramentas de simulação) ou estacionários (expressões matemáticas baseadas em princípios físicos e fatores de correção). Os métodos de medição utilizam faturas de energia ou monitorização dos diversos sistemas de energia presentes num edifício. A utilização de ambas as



formas de quantificação, métodos híbridos, pode ser atingida através de calibração de modelos de simulação dinâmica ou modelação dinâmica inversa (Wang et al. 2012) .

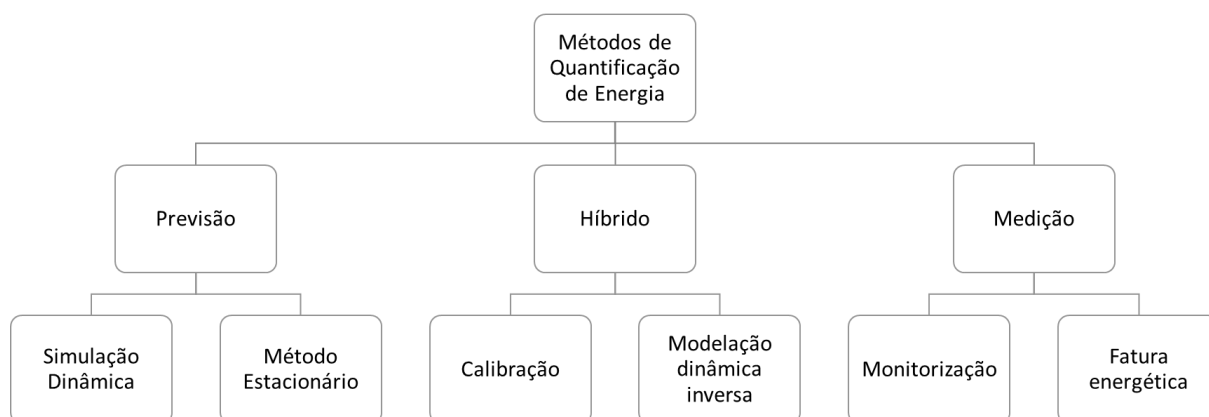


Figura 5 - Métodos de quantificação de energia para edifícios existentes  
Adaptado de (Wang et al. 2012)

A avaliação energética pode ser prevista através de um método dinâmico, adotado para simulação detalhada, que tem em conta a dinâmica térmica da envolvente e dos sistemas, ou por método estacionário, onde os efeitos dinâmicos são ignorados ou simplificados através de fatores de correlação, de modo a diminuir a complexidade de cálculo.

Para ambos os processos, estacionário ou dinâmico, o procedimento de cálculo pode ser estabelecido em modelos determinísticos ou modelação inversa (modelos de regressão). O modelo determinístico, ou modelo físico, inicia com uma descrição dos componentes do edifício de modo a criar um modelo termodinâmico. Os modelos de simulação inversa relacionam os indicadores de desempenho (consumo energético) com um ou mais fatores de influência (por exemplo, condições climáticas, área útil). De modo geral, o processo envolve a criação de um modelo do edifício, uma série de diferentes modelos de regressão, comparação de resultados e seleção do melhor modelo.

Para qualquer cálculo, a previsão de consumo de energia e o consumo real apresentam discrepâncias inevitáveis. Para novos edifícios, o método de cálculo é a única opção possível. No entanto, para edifícios existentes, a quantificação de energia pode ser baseada em dados de medição. A fatura energética é um desses instrumentos. Mas a informação original não permite um diagnóstico a diferentes níveis uma vez que maioritariamente o consumo é agregado independentemente do tipo de uso final de energia. Outra forma de obter dados de medição consiste na colocação de aparelhos de monitorização no local, de modo a ter uma caracterização mais detalhada.

O terceiro método consiste no uso de sistemas híbridos em que um método de cálculo é suplementado por medições de energia de modo a reduzir as diferenças entre os valores previstos e os valores reais de consumo de energia. Dois exemplos desses processos são a calibração e a modelação dinâmica inversa.

A calibração é um processo que usa uma ferramenta de simulação para refinar os resultados iniciais de modo a que a precisão seja semelhante aos dados de medição. Segundo este método, apenas após ser submetido a este processo de calibração é que o modelo produz resultados credíveis. É uma ferramenta essencial para estimar as poupanças obtidas através de aplicação de medidas de eficiências energética em edifícios existentes.

O cálculo de energia através de modelos inversos dinâmicos deve envolver medições locais para identificação do modelo. Ao contrário dos modelos estacionários, os modelos dinâmicos são capazes de capturar efeitos como a massa térmica que tradicionalmente requer a solução de equações diferenciais. As desvantagens destes modelos relacionam-se com a sua complexidade e das medições para afinar o modelo requererem uma precisão elevada. Um exemplo típico deste tipo de modelos são as séries de Fourier e as redes neuronais artificiais.

#### **2.4.1 Simulação dinâmica**

As ferramentas de simulação dinâmica deterministas permitem obter uma visão integrada e estudar diversos parâmetros do modelo do ponto de vista energético. O cálculo do consumo de energia pode ser realizado para todos os componentes do edifício para um intervalo de tempo determinado pelo utilizador. Os seus cálculos baseiam-se em princípios físicos e interações térmicas que têm em conta variáveis ambientais, como condições climáticas, e características do edifício como materiais de construção, operação e subsistemas desde AVAC, iluminação e equipamentos (Zhao & Magoulès 2012).

O processo de simulação envolve duas fases:

- Construção de um modelo geométrico do edifício com as características energéticas dos materiais que o constituem. São necessários alguns dados de entrada como, por exemplo, temperatura do ambiente exterior, sombreamento, ocupação e infiltração;
- Simulação do modelo construído; esta etapa inclui os algoritmos matemáticos de simulação, que envolve o cálculo das cargas térmicas, cargas dos sistemas e análise holística do edifício. Utiliza a informação descritiva inserida na etapa anterior para calcular as cargas de aquecimento e arrefecimento do edifício.

Como resultados podem-se obter diversos parâmetros:

- Cargas térmicas de aquecimento e de arrefecimento, bem como cargas internas resultantes de iluminação, equipamentos elétricos ou sistemas de ventilação;
- Baseado nos processos de condução, convecção e radiação existe a capacidade de calcular as trocas de calor com o exterior e as zonas adjacentes;
- Consumo energético e carga instantânea por período horário, a nível de zona ou de equipamento consumidor.

Através destes resultados pode-se avaliar o desempenho de um edifício integrando todos os seus componentes, o cumprimento de regulamentos energéticos bem como os custos associados à faturação energética e à implementação de medidas de melhoria.

#### 2.4.1.1 *EnergyPlus*

*EnergyPlus* é um programa informático, desenvolvido em código aberto, específico para a análise térmica e energética de edifícios. O seu desenvolvimento teve como origem os programas BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2 que foram criados no final dos anos 70 e início dos anos 80 como ferramentas de simulação energética. O uso de linguagem de programação *Fortran 90* permitiu a criação de uma estrutura organizada e modular que facilita a adição de novas funcionalidades e ligações para outros programas de interface, como o *plugin OpenStudio* integrado no *software CAD Sketchup*, ou outros como *DesignBuilder* e *ECOTECT* (U.S. DOE 2013).

O *EP-Launch* é o elo de ligação entre os ficheiros de dados de entrada (*IDF - Input Data File* e Ficheiro Climático) com o motor de simulação (*Energyplus.exe*). O *IDF Editor* fornece uma abordagem estruturada de edição dos valores de entrada através de um conjunto de objetos onde são inseridos e determinados os parâmetros, condições, características e outros referentes ao edifício em estudo (Figura 6). Estes objetos estão reunidos por grupos, como por exemplo, *Site:Location*, *ScheduleCompact*, *Construction*, *BuildingSurface:Detailed*, *People*, *Lights*, *ZoneInfiltration: DesignFlowRate*, *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*. Para calcular as interações energéticas do edifício o programa precisa de um ficheiro climático representativo da zona meteorológica em que se insere o modelo.

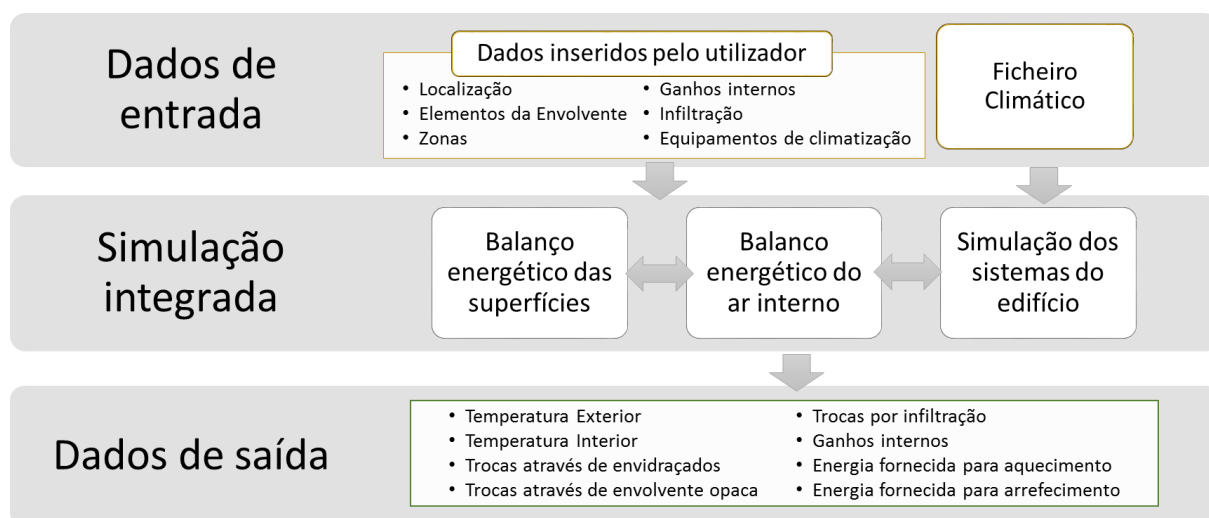


Figura 6 – Etapas de simulação em *EnergyPlus*

Adaptado de (Mateus 2012)

Após inserção das características iniciais é executada a simulação integrada que engloba três fases. O balanço energético das superfícies realiza a avaliação do fluxo de energia em cada superfície considerando os efeitos de condução, convecção e radiação. O balanço energético do ar interno lida com as trocas térmicas do ar derivadas de ventilação, ar de exaustão e infiltrações. Este módulo tem em conta a carga térmica do ar em cada espaço e avalia os ganhos térmicos por convecção. A simulação dos sistemas do edifício modela o sistema de AVAC e sistemas elétricos (Figura 6). Por fim, o programa produz diversos ficheiros de resultados que podem precisar de processamento de modo a que a sua avaliação atinja os objetivos pretendidos pelo utilizador.

A equação 7 representa a forma como o programa efetua o balanço térmico para um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

$$C_z \frac{dT_s}{dt} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} c_p (T_{\infty} - T_s) + \dot{Q}_{sis} \quad [7]$$

Em que:

- $C_z \frac{dT_s}{dt}$ , energia armazenada no ar.
- $\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_i$ , soma dos ganhos convectivos interiores
- $\sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ , transferência convectiva de calor das superfícies
- $\sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z)$ , transferência de calor por mistura de ar entre zonas
- $m_{inf} c_p (T_{\infty} - T_s)$ , trocas de calor por infiltração de ar exterior
- $\dot{Q}_{sis}$ , carga térmica do sistema AVAC, introduzida na zona.

### 3 Integração de produção de energia fotovoltaica em edifícios

#### 3.1 Setor fotovoltaico

A redução de custos da energia fotovoltaica e o aumento do preço da eletricidade ajudaram a atingir a *grid-parity* em alguns segmentos de mercado em países da União Europeia (Green 2007). Este conceito refere-se ao momento em que as poupanças na eletricidade ou as receitas geradas pela venda de energia fotovoltaica no mercado igualam ou superam o seu custo de instalação e financiamento do sistema fotovoltaico a longo prazo.

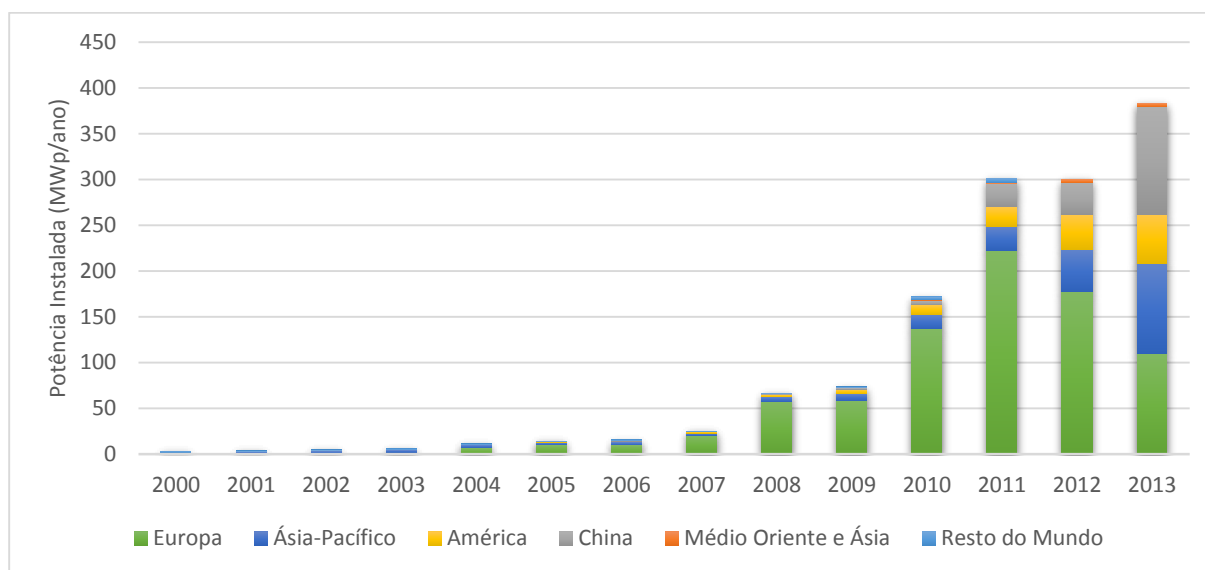


Figura 7 – Potência anual instalada de tecnologia fotovoltaica

(Green 2007)

A queda de preços, consequência da rentabilidade de fabrico e da curva de aprendizagem dos mercados, associados à modularidade desta tecnologia que possibilita a sua instalação no local onde a energia é consumida contribuem para o crescimento de instalação desta tecnologia (Figura 7) (Barbose et al. 2012) (International Renewable Energy Agency 2012).

No setor das aplicações em coberturas de edifícios, diferentes estratégias tem sido desenvolvidas pelos países da União Europeia. Enquanto Portugal, Bélgica, Holanda e Dinamarca têm investido no setor residencial outros países têm focado o seu investimento em aplicações no setor comercial como a Eslováquia. Outros apresentam uma forte componente de sistemas instalados em terreno (Roménia e Suíça) ou um equilíbrio entre aplicações residenciais e comerciais ( Figura 8).

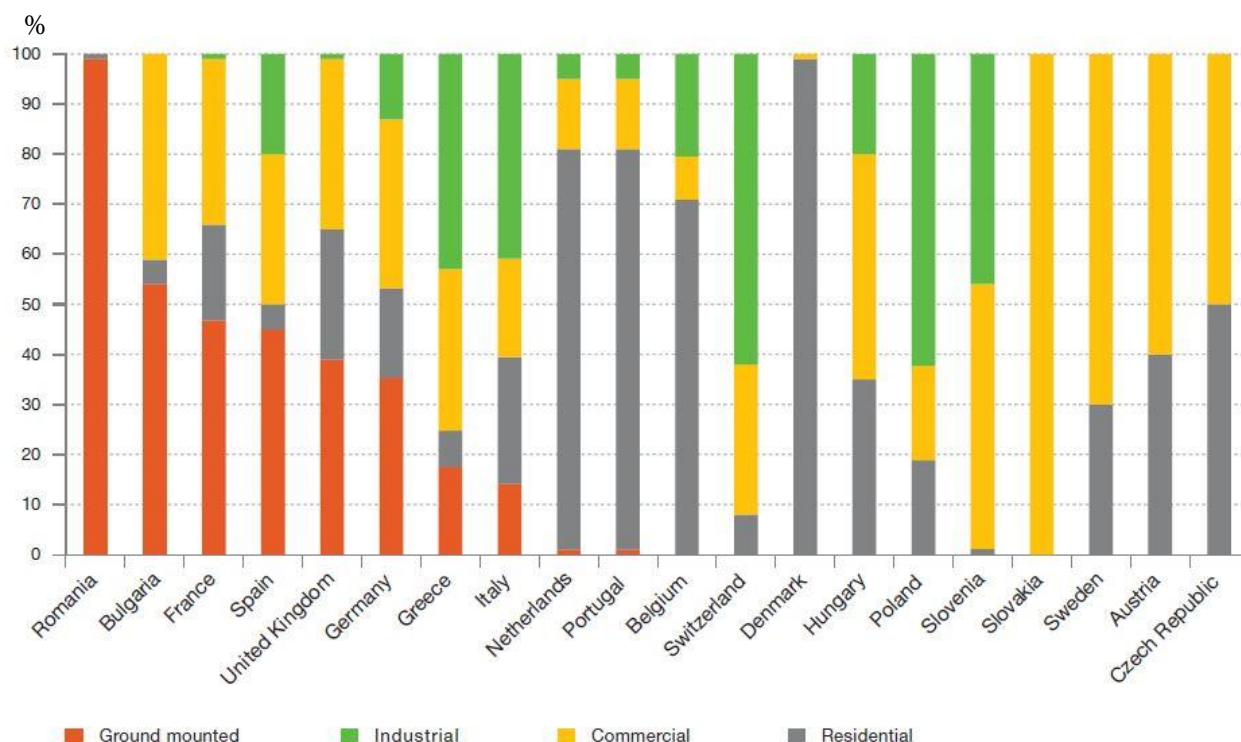


Figura 8 – Segmentação do mercado fotovoltaico no mercado europeu em 2013

(Green 2007)

O sistema de produção fotovoltaico oferece benefícios tanto no setor elétrico e para o ambiente como para o próprio consumidor. Para o consumidor, os benefícios representam a venda da produção elétrica à rede ou o consumo próprio da eletricidade produzida, reduzindo a fatura.

### 3.2 Sistema fotovoltaico

Do ponto de vista de capacidade de produção dos sistemas solares é importante estabelecer o nível de integração em cada um dos edifícios em questão. Para tal, é necessário ter em consideração:

- Superfície do edifício;
- Irradiação solar;
- Área disponível para instalação;
- Características técnicas do sistema.
  - Módulos
  - Inversores
  - Cabos e outros

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico é complexo uma vez que existem diferentes variáveis, de ordem técnica e de ordem económica. As características técnicas do sistema advêm da escolha dos componentes a utilizar, qual a sua função e modo de funcionamento (Figura 9).

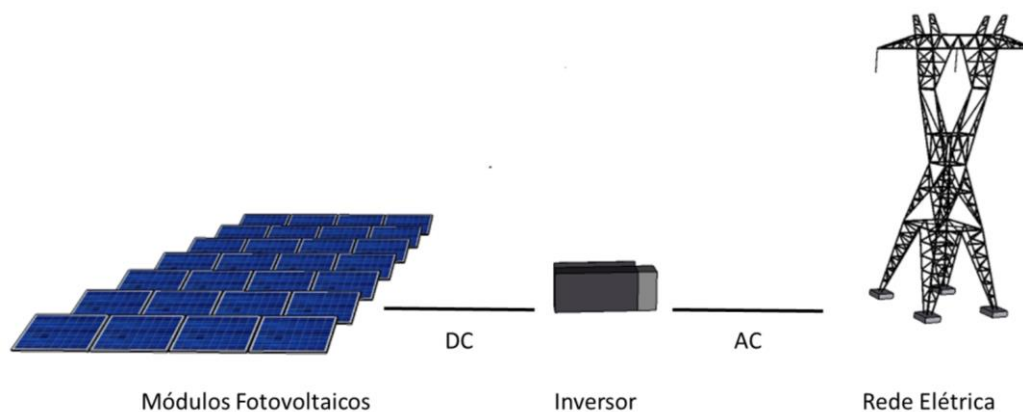


Figura 9 – Componentes de um sistema fotovoltaico com ligação à rede elétrica

Um módulo fotovoltaico é constituído por múltiplas células fotovoltaicas e por várias camadas com funções que vão desde a proteção do próprio módulo a questões mais arquitetónicas. Contudo, a característica mais importante do módulo é a tecnologia da célula fotovoltaica. Dada a baixa potência de uma célula fotovoltaica, estas são ligadas em série e em paralelo o que estabelece a potência do módulo. Existem vários tipos de tecnologias de células com diferentes eficiências cuja escolha depende de vários fatores como a orientação do sistema, presença ou não de sombreamento, espaço disponível e do custo do próprio módulo.

A eficiência do módulo é calculada pela equação 8, onde  $P_m$  é a potência do módulo (Wp),  $I$  é a irradiação solar ( $\text{W/m}^2$ ) e  $A_c$  é a superfície de captação do módulo ( $\text{m}^2$ ). Estes valores são obtidos em condições *standard* (STC – *Standard Test Conditions*) –  $1000 \text{ W/m}^2$ , espectro de massa de ar de 1.5 e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

$$\eta = \frac{P_m}{I \times A_c} \quad [8]$$

Tipicamente os elementos de conversão são classificados em duas tecnologias principais (Cerón et al. 2013):

- Silício cristalino (c-Si), em que o módulo é montado através da ligação de várias células solares. Tem como ponto forte a sua longa durabilidade e o seu valor de conversão elevado. A potência instalada por unidade de área é superior ao de outras tecnologias. Este pode ser dividido entre silício monocristalino ou multicristalino.
- Filmes Finos (*Thin-film Solar Cells*) fabricadas através da deposição de finas camadas de material semiconductor de modo a obter um elemento translúcido rígido ou flexível. Tem como vantagem as suas dimensões geométricas, a sua flexibilidade e capacidade de poder ser colocado sobre a superfície de outros materiais.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores típicos de eficiência segundo a tecnologia fotovoltaica utilizada.

Tabela 1 - Eficiência por tecnologia de fabrico (Cerón et al. 2013)

Tecnologia	Material	Eficiência
<b>Silício Cristalino</b>	Si-mono	14%-19%
	Si-multi	12%-15%
<b>Filmes Finos</b> <i>(Thin-film Solar Cells)</i>	a-Si	5%-7%
	CIS	10%-13%
	CIGS	11%-13%
	CdTe	10%-12%

A par dos módulos, o inversor de corrente contínua para corrente alternada (CC/CA) é o componente principal de uma instalação fotovoltaica e a sua principal função é converter o sinal contínuo do gerador fotovoltaico num sinal alternado com as mesmas características da rede elétrica. Para além da conversão do sinal o inversor pode assumir outras funções como o ajuste do ponto operacional do inversor ao *Maximum Power Point* (MPP) do gerador (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT), dispositivos de proteção CC e CA e registo de dados operacionais e sinalização.

Para complemento do sistema, são ainda necessários outros componentes como cabos, elementos de proteção elétrica e estrutura de suporte do módulo.

### 3.3 Capacidade de instalação

A energia produzida por um sistema fotovoltaico depende das características técnicas dos aparelhos elétricos; eficiência do inversor, do cabo de ligação e do próprio painel em condições meteorológicas variáveis que perfazem um desempenho não ideal. Estas variáveis podem ser categorizadas como incertezas de potencial físico, geográfico e técnico que afetam o desempenho do sistema fotovoltaico (Figura 10).



Figura 10 - Informação necessária para estimar a produção de um sistema fotovoltaico

Adaptado de (Bergamasco & Asinari 2011)



O potencial físico depende da insolação da área de estudo e dos objetos de sombreamento que possam existir. Existem ferramentas que permitem fazer esta avaliação com recurso a estações meteorológicas, imagens satélite e modelos numéricos. A plataforma *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* é uma ferramenta que tem capacidade de determinar a irradiação média diária, mensal ou anual para África, Europa e parte da Ásia. Os seus dados têm origem em estações meteorológicas ou imagens satélites.

O potencial geográfico restringe os locais onde essa energia pode ser capturada através da área e tipo de cobertura disponíveis. Equipamentos de AVAC, sistemas de água quente sanitária (AQS), chaminés, tubos de ventilação, parapeitos, casas de elevador e de escadas e esplanadas são alguns dos elementos que podem reduzir a área disponível (Loulas et al. 2012).

O potencial técnico tem em conta as características e desempenho dos elementos que transformam a energia solar em energia elétrica. Perdas como funcionamento do painel abaixo das condições STC, levando a uma potência fornecida inferior, térmicas, conversão de CC para CA pelo inversor, desempenho inferior com baixos níveis de radiação, reflexão na superfície do módulo, neve e terra, espectrais, de ligação, falhas de equipamentos e degradação dos materiais. Para perceber o verdadeiro potencial técnico da instalação é preciso ter em conta ainda outros fatores, como sombreamento entre módulos, áreas de manutenção e serviços. O sombreamento entre filas paralelas de módulos pode subdimensionar a energia produzida pelo sistema e a orientação do edifício e a sua estrutura, os ângulos de inclinação e azimute dos módulos.

Para além do potencial de produção, fatores económicos e sociais podem influenciar a viabilidade de um sistema fotovoltaico, como política energética, ligação à rede, custos de capital e mão-de-obra de instalação.

Para a instalação em edifícios, considerando os aspetos técnicos da tecnologia ou puramente o ponto de vista arquitetónico as aplicações fotovoltaicas têm sido categorizadas de modo a apontar a sua aplicação do ponto de vista do edifício, como material convencional de construção (Cerón et al. 2013):

- *Building Integrated Photovoltaic*, BIPV, com duas vertentes; substitui os elementos convencionais de construção e gera energia.
- *Building Applied Photovoltaic*, BAPV, elementos em que a sua instalação é um acrescento à envolvente do edifício, através de uma disposição de painéis em paralelo na cobertura ou fachada do edifício.

No entanto, nem sempre as estruturas urbanas são compatíveis com aplicações solares. Enquanto em áreas não urbanas, os fatores limitativos relacionam-se com constrangimentos de potencial solar e condições climáticas, em ambiente urbano a área disponível e os elementos de sombreamento da radiação solar definem em maioria a capacidade de produção. (Freitas et al. 2015)

### 3.4 Metodologias de dimensionamento

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico representa um ponto importante para uma avaliação potencial solar de um edifício. Esta análise pode ser feita apenas na base de recurso solar ou com grande detalhe através do dimensionamento dos componentes do sistema fotovoltaico. Pode igualmente recorrer a métodos estatísticos, modelos matemáticos ou modelos computacionais. A escala pode atingir o cálculo de regiões inteiras ou de um edifício apenas.

Izquierdo e a sua equipa (Izquierdo et al. 2008) analisaram o potencial solar em coberturas para Espanha através de imagens aéreas e dados de informação geográfica, apresentando valores de potencial para as diferentes regiões autónomas do país. Foi feita uma estimativa da área disponível a partir de coeficientes sombreamento e de outras ocupações como equipamento de climatização, obtidos através de métodos estatísticos.

Outra avaliação foi feita por Santos e a sua equipa (Santos et al. 2014) que avaliou o potencial solar numa zona residencial de Lisboa, conjugando dois fatores: a radiação incidente na cobertura de cada edifício e a população residente em cada edifício. Por outro lado, uma avaliação mais detalhada mas em menor escala foi estudada através da disposição e configuração de um sistema fotovoltaico em (Celik et al. 2015).

A equipa de Loulas (Loulas et al. 2012) estudou o potencial de produção de um sistema fotovoltaico integrado em edifícios na Grécia recorrendo ao *software Sketchup e PVSyst* na Grécia, tendo em conta sombreamentos e áreas não disponíveis (Figura 11).

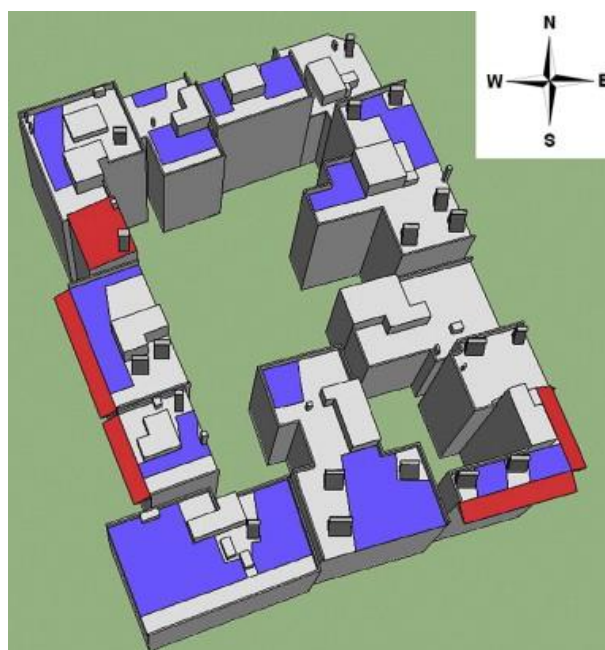


Figura 11 - Área disponível para implementação de fotovoltaico (Azul)

Com o avanço das tecnologias computacionais, o estudo espacial tem ganho relevância no dimensionamento do sistema fotovoltaico em coberturas. Projetos que associam programas de desenho assistido por computador (DAC), como o caso do *Sketchup* e do *plugin Skelion* crescem como forma intuitiva de dimensionar um sistema de aproveitamento renovável.

*Skelion* é um *plugin* para *Sketchup* que foi criado em 2011 por Juan Pons e Sam Jenkins. Prevê a produção elétrica de um número de componentes fotovoltaicos dispostos numa superfície. Obstruções solares podem ser projetadas sobre o telhado com uma distância ou uma limitação de sombra em solstício para determinar o número de painéis a instalar. A georreferenciação do edifício e terreno adjacente é feita a partir do *Google Earth* e a previsão de produção é adquirida a partir da base de dados de *PVGIS* ou *PVWatts*, dependendo da localização da estrutura. Pode calcular perdas de produção devidas a sombreamento das imediações, a percentagem de radiação solar disponível para cada painel. Os resultados são apresentados em relatório contendo os componentes e a produção elétrica anual. (Freitas et al. 2015).

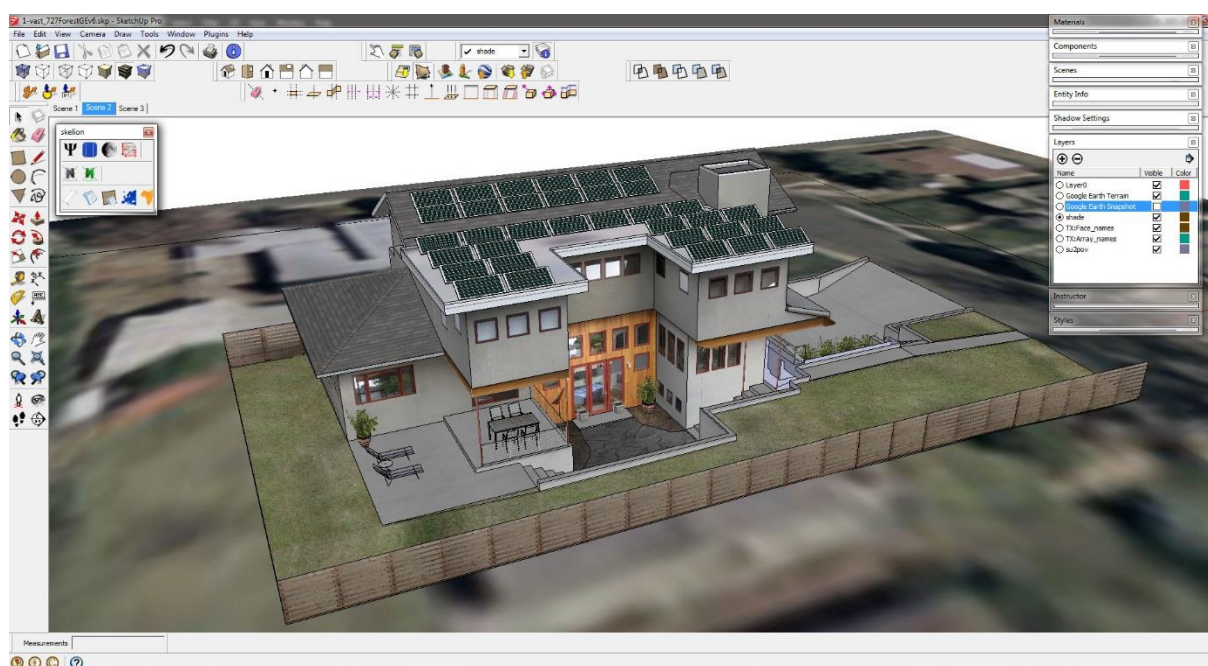


Figura 12 - Exemplo de um modelo e ambiente de trabalho do *Sketchup* e *Skelion* (Sketchup Skelion solar design Plugin n.d.)

## 4 Enquadramento Legal

A eficiência energética em edifícios é verificada por normas, políticas e regulamentos que estabelecem requisitos mínimos de eficiência energética para a modificação dos edifícios existentes tanto a nível nacional como internacional (Sekki et al. 2015). Os governos podem fornecer apoio financeiro e subsídios para ajudar os proprietários a alcançar as metas de desempenho energético pretendidos com a implementação de medidas de redução de consumo através de três instrumentos principais (Nolte & Strong 2011):

1. Instrumentos Regulatórios – códigos de energia que estabelecem requerimentos para uma classe mínima de desempenho energético (certificação energética);
2. Instrumentos Informativos – etiquetas energéticas são as mais conhecidas como instrumento político, para equipamentos e edifícios;
3. Esquemas de Incentivo – um complemento aos dois anteriores. Ajudam a aumentar o interesse do investimento na eficiência energética. Incluem incentivos de ordem fiscal, financeira ou económica. O seu objetivo é motivar os consumidores de forma a efetuar um investimento que de outra forma não considerariam.

A certificação energética é uma subcategoria dos processos de avaliação ambiental global de um edifício. Enquanto esquemas ambientais qualitativos como o BREEAM e o LEED são voluntários a certificação energética é obrigatória na UE, devido às diretivas que estabelecem os princípios para certificação e inspeção que cada país deverá incluir na sua regulamentação. A versão mais atual da EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) foi lançada em 2010.

Em Portugal foi implementada, em 2010, a Estratégia Nacional para a Energia com objetivos traçados para 2020, através de dois objetivos principais (Teixeira 2013):

1. Promoção da eficiência energética
2. Aposta nas energias renováveis e endógenas, estabelecendo-se uma contribuição mínima de 31% de origem renovável no *mix* global de consumo de energia final e de 60% no *mix* de energia elétrica, bem como uma redução de 20% no consumo de energia final.

Recentemente, a política portuguesa implementou uma reformulação energética legislativa, uma vez que o sistema de certificação de edifícios incluiu um novo diploma em 2013, o Decreto-Lei nº118/2013, e a produção de energia distribuída foi lançada em 2014 com o Decreto-Lei nº153/2014 que prevê a produção de energia no local de consumo podendo esta ser ligada à rede ou não, ser de origem renovável ou não e ser remunerada em regime de autoconsumo ou de pequena produção.

### 4.1 Sistema de Certificação energética (DL 118/2013 – P349-D)

O diploma 118/2013 estabelece a portaria 349-D como o Regulamento de Edifícios de Comércio e Serviços. Para analisar a eficiência energética de um edifício recorre-se ao indicador de eficiência

energética (*IEE*), expresso em unidades de energia primária que caracteriza energeticamente o edifício. Este indicador tem uma dupla função: categorizar os consumos dos edifícios (através de três classes distintas, *S*, *T* e *Ren*) e categorizar o edifício através da comparação entre indicadores de referência, previsto e efetivo (Figura 13).

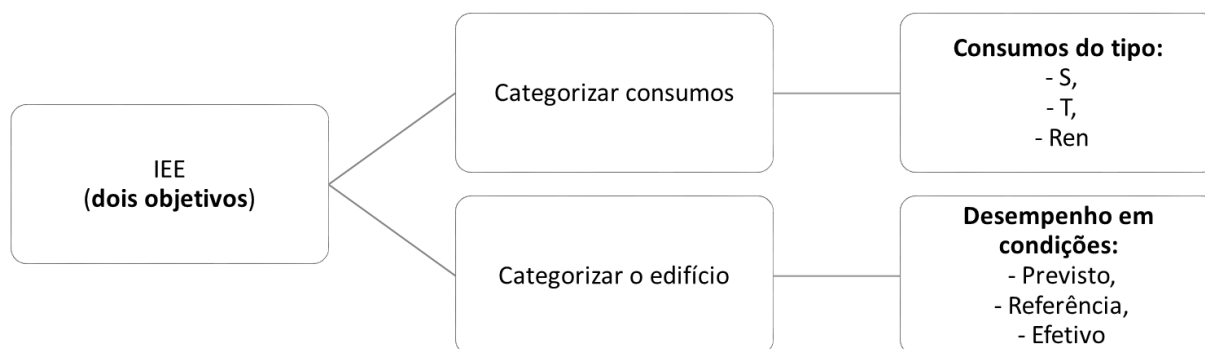


Figura 13 - Função dos indicadores usados na certificação energética

O primeiro objetivo pretende saber quais os tipos de consumo que efetivamente devem ser contabilizados para a certificação energética do edifício (Figura 14). Consumos do tipo *S* são contabilizados para o  $IEE_S$  que conduz à certificação energética enquanto os do tipo *T* não são contabilizados para esse efeito. Este tipo de consumos apenas contribui para o valor de *IEE* global, para comparação com outros edifícios. *Ren* refere-se à energia renovável produzida no local.

$IEE_S$	$IEE_T$
Aquecimento e arrefecimento ambiente (inclui humedificação e desumidificação)	---
Ventilação e bombagem associados ao sistemas de climatização	Ventilação e bombagem não associada a controlo da carga térmica
Iluminação interior	Iluminação dedicada e de utilização pontual
AQS e piscinas	Equipamentos de frio
Elevadores, escadas e tapetes rolantes (2016)	Elevadores, escadas e tapetes rolantes (até fim de 2015)
Iluminação exterior (2016)	Iluminação exterior (até fim de 2015)

Figura 14 - Consumos de energia considerados (*S*) ou não (*T*) para cálculo da classe energética  
(Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços 2013)

Assim consumos relacionados com aquecimento e arrefecimento ambientes bem como ventiladores e bombas associadas ao sistema de climatização são contabilizados para o  $IEE_s$ . São ainda contabilizados a iluminação interior e os consumos para AQS e piscinas. A partir de 2016 serão contabilizados o consumo de energia decorrente de escadas, tapetes rolantes, elevadores e iluminação exterior. Na gama do  $IEE_T$  são incluídos sistemas de ventilação e bombagem não associados ao controlo da carga térmica assim como iluminação dedicada e equipamentos de frio. Até 2016 são contabilizadas nesta categoria escadas e tapetes rolantes, elevadores e iluminação exterior.

O segundo objetivo avalia o tipo de  $IEE$  a ser usado para a definição da classe energética. Na Figura 15 são descritos os diferentes tipos de indicadores apresentados na legislação.

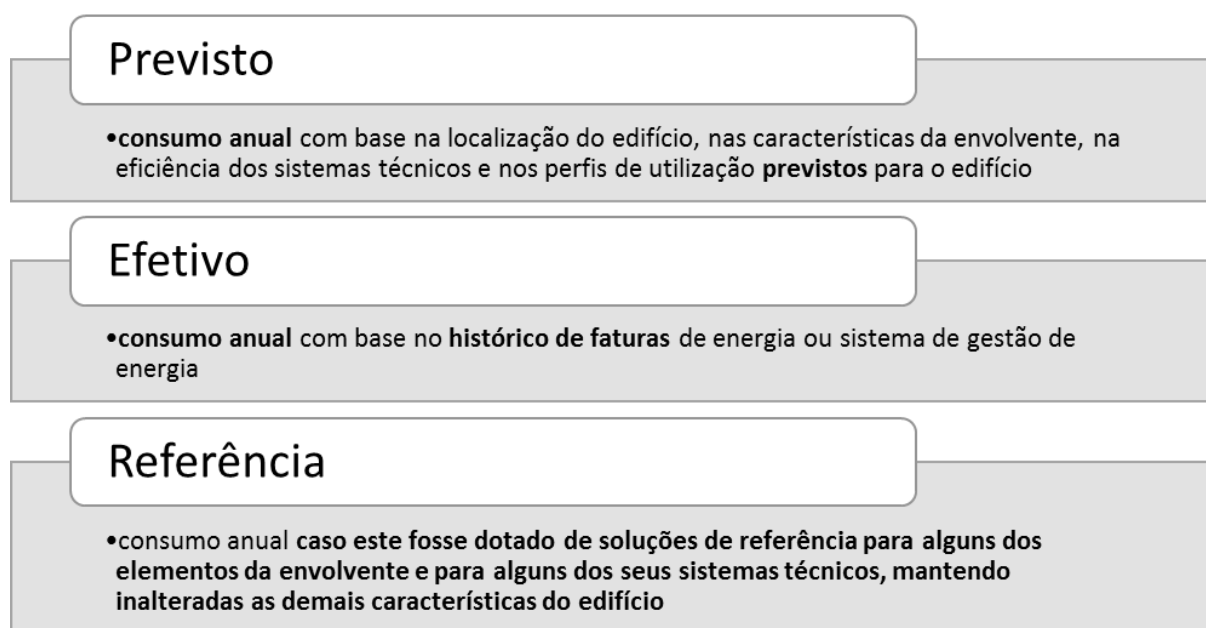


Figura 15 - Tipos de IEE

Adaptado de (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços 2013)

O  $IEE$  do edifício e consequentemente a sua classificação energética é obtida através das etapas apresentadas na Figura 16. A etapa de calibração só é possível em edifícios energéticos com fatura energética. Após calibração do modelo dinâmico este é simulado em condições previstas de funcionamento. A partir dos consumos obtidos procede-se ao cálculo do  $IEE$  *previsto*. De seguida, inserem-se os parâmetros que irão definir o mesmo edifício mas em condições padrão. Estes parâmetros são estabelecidos na legislação e são referentes à envolvente do edifício e à eficiência dos sistemas de energia de climatização, iluminação e ventilação. Os resultados determinam o  $IEE$  *referência*.

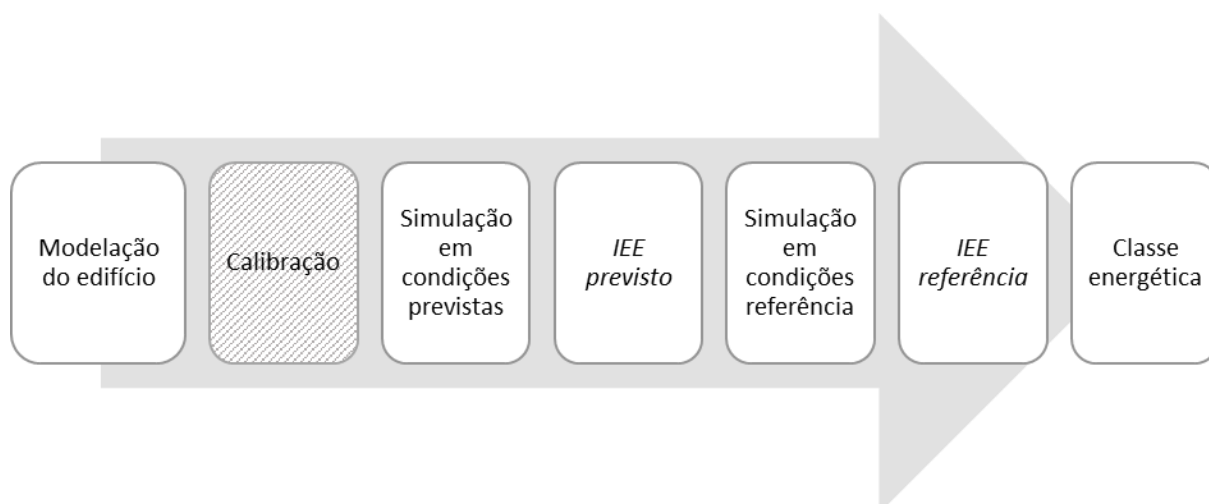


Figura 16 - Processo de certificação por simulação dinâmica

Por comparação do  $IEE_{previsto}$  com o  $IEE_{referência}$ , é obtido o valor que traduz a classe energética do edifício (equação 9). A correspondência entre o valor obtido e classe energética pode ser observada na Figura 17.

$$R_{IEE} = \frac{IEE_{previsto} - IEE_{REN}}{IEE_{Referência}} \quad [9]$$

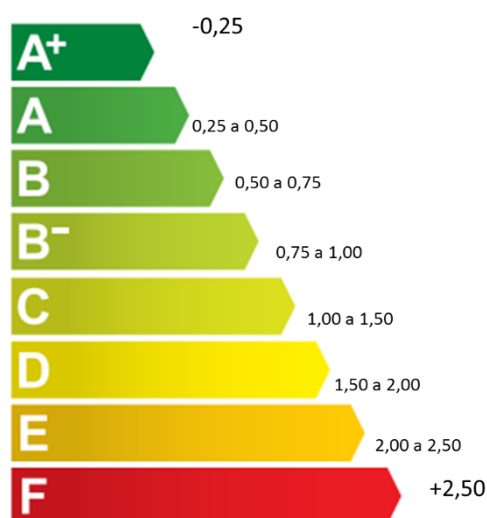


Figura 17 - Intervalos de  $R_{IEE}$  que determinam a classe de um edifício de comércio e serviços

Por fim, realiza-se a avaliação dos requisitos mínimos de eficiência do ponto de vista do ótimo de rentabilidade, determinando o equilíbrio ótimo entre o investimento inicial e os custos de manutenção e de energia ao longo do ciclo de vida dos equipamentos do edifício. Caso a classe energética se encontre abaixo do valor mínimo estabelecido, classe D, é necessário aplicar um plano de melhorias que tem como prioridade a identificação dos pontos de maior gasto de energia do edifício que estabeleçam uma poupança energética e financeira.

## 4.2 Produção de Energia Distribuída (DL 153/2014)

O Decreto-Lei nº 153/2014 estabelece os requisitos e procedimentos para a produção de eletricidade a partir de energia em regime de produção distribuída, ou seja, produção no local de consumo. A produção distribuída estabelece dois métodos de produção: autoconsumo e pequena produção. Enquanto no primeiro caso pode existir ligação e venda de energia à rede e a produção ser ou não de fonte renovável, a segunda rege-se pela obrigatoriedade de estar ligada à rede e ter de usar uma única tecnologia renovável como forma de produção. Neste regime, toda a energia produzida é vendida à rede, como acontecia nos antigos regimes de micro e minigeração (Decreto-Lei n.º 34/2011) (Figura 18).

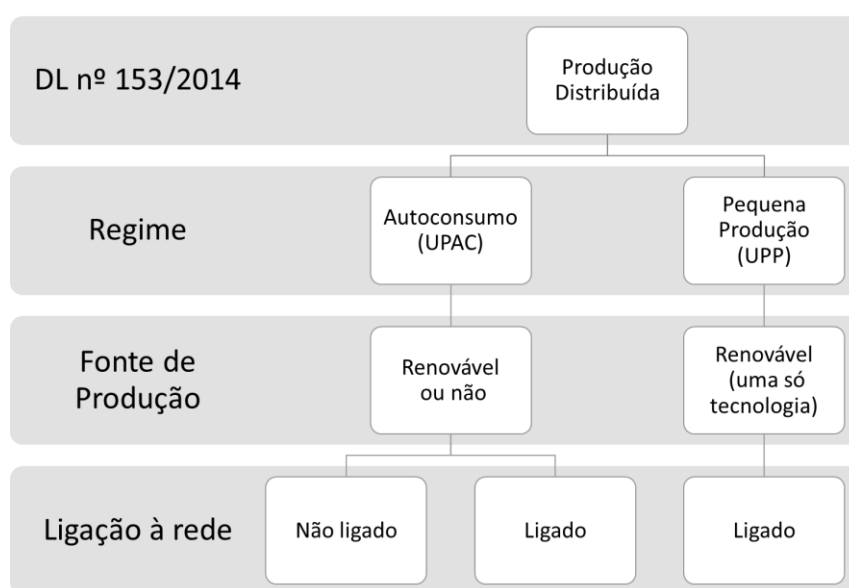


Figura 18 - Características dos regimes de produção distribuída  
(Decreto de Lei 153/2014 2014)

Para usufruir destes regimes são necessários diferentes requisitos:

1. Dispor de uma instalação elétrica consumidora de energia;
2. Caso esteja ligada à rede elétrica, contrato de energia;
3. A potência de ligação não seja superior a 100% da potência contratada;
4. Realização de uma auditoria energética com aplicação de medidas de eficiências energética com período de retorno definido consoante o escalão de potência em que se encontra a central projetada.

Para uma unidade de produção de autoconsumo (UPAC) a energia vendida à rede tem uma compensação ao preço de mercado grossista, ou seja, de preço de produção de energia no mercado ibérico e não o valor pago pelo consumidor final (mercado doméstico). Ao valor da tarifa de venda é ainda descontado 10% devido a custos de rede. Estas unidades têm ainda outros custos para unidades acima de 1.5 kW que estejam ligadas à rede:



- Compensação de CIEG (Custos de Interesse Económico Geral), custos decorrentes de medidas de política energética de sustentabilidade ou de interesse económico geral. Esta compensação depende da representatividade do autoconsumo no sistema elétrico, pelo que em período inicial será nula. É uma compensação fixa durante 10 anos.
- Um seguro de responsabilidade civil obrigatório (a publicar em portaria futura).
- Encargos de modificações da instalação elétrica no ponto de ligação e contadores.

Assim, para estas unidades a remuneração é estabelecida através da equação 10.

$$R_{UPAC} = E_{fornecida} \times tarifa_{OMIE} \times C_{rede} \times C_{CIEG} \quad [10]$$

Em que  $R_{UPAC}$  é a remuneração mensal da eletricidade fornecida à rede,  $tarifa_{OMIE}$  valor de preços de fecho do Operador de Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal,  $C_{rede}$  desconto do custo de rede, neste caso 0.9, e  $C_{CIEG}$  compensação mensal por kW de potência instalada que permite recuperar uma parcela dos CIEG que é definida pela equação 11.

$$C_{CIEG} = P_{UPAC} \times V_{CIEG_t} \times K_t \quad [11]$$

Em que  $P_{UPAC}$  é a potencia instalada da UPAC,  $V_{CIEG_t}$  valor que permite recuperar os CIEG em €/kW no ano  $t$ , e  $K_t$  coeficiente de ponderação tendo em conta a representatividade das UPAC no Sistema Elétrico Nacional, que pode tomar o valor de 0, caso a potência das UPAC represente menos de 1% da potência instalada do sistema elétrico nacional, 30% caso esse quociente seja entre 1 a 3% e 50% caso seja superior a 3%. Para 2015, o valor de  $V_{CIEG_t}$ , é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valor associado à recuperação dos CIEG em 2015  
(ERSE 2014)

Nível de Tensão/ Tipo de fornecimento	$V_{CIEG_t}$ 2015 (€/kW.mês)
AT	2.617
MT	3.062
BTE	3.819
BTN>20.7 kVA	3.308
BTN≤20.7 kVA	5.780

O regime de pequena produção aplica uma tarifa bonificada durante um período inicial de exploração. Após esse período o regime geral entra em vigor. O valor desta tarifa bonificada é publicado anualmente pela portaria do governo. Os valores dos últimos anos estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Características de remuneração por regime de produção

Regime	Tarifa venda	Tarifa evitada	Observações
<b>Autoconsumo</b>	46 €/MWh <sup>2</sup>	Depende do contrato de energia	-10% Custos de rede
<b>Minigeração 2014</b>	106 €/MWh <sup>3</sup>	NA	-7% Desconto tarifa anual

O novo diploma de produção distribuída vem realçar uma perspetiva que tinha sido posta em segundo plano: a produção de energia para consumo próprio. Torna-se possível instalar sistemas de produção renovável como uma solução de eficiência energética, uma vez que a energia produzida não servirá para obter uma receita mas antes para diminuir o custo associado ao consumo. Paralelamente, isto irá repercutir-se no desempenho energético do edifício, uma vez que este será valorizado na sua classificação energética, segundo o sistema de certificação de edifícios.

---

<sup>2</sup> Custo Médio de Aquisição para 2014 (ERSE 2014).

<sup>3</sup> Tarifa para fotovoltaico em 2014, no antigo regime de Miniprodução, uma vez que a portaria referente a Pequena Produção não foi lançada em tempo útil deste trabalho.

## 5 Metodologia

### 5.1 Análise de consumo de energia

A primeira etapa do trabalho consistiu na recolha de informação referente ao edifício em estudo. O fornecimento de documentos permitiu caracterizar o edifício da forma mais exata possível. Os dados recolhidos referem-se a:

- Envolvente, através de plantas e constituição de paredes, tetos, chão e vãos envidraçados;
- Equipamentos consumidores intensivos de energia, como sistemas de climatização, ventilação e iluminação;
- Equipamentos de utilização pessoal, como computadores, impressoras;
- Perfis de ocupação, de modo a estimar ganhos internos derivados da presença humana;
- Perfis de utilização, com o fim de estimar consumos energéticos dos equipamentos existentes;
- Faturas de energia e outras formas de contabilização de energia, para calibração do modelo computacional em condições reais.

Com esta informação foi construído o modelo a partir do qual três tipos de simulação foram realizadas. A primeira para condições reais de funcionamento onde os resultados foram comparados com os consumos apresentados pelas faturas de energia permitindo a calibração do modelo de simulação dinâmica. O processo de calibração consistiu num conjunto de iterações, como por exemplo a alteração de períodos de funcionamento de sistemas ou ocupação, até serem atingidas diferenças entre as faturas de energia e os resultados do modelo de simulação com valores inferiores 10% na base anual e 25% nos valores mensais.

A segunda simulação realizou-se em condições previstas, de modo a respeitar as exigências da legislação portuguesa de certificação energética e a terceira em condições de referência de utilização (alteração de alguns parâmetros segundo a regulamentação de certificação energética portuguesa). Com a simulação em condições de utilização previstas e de referência foi possível determinar a classe energética do edifício em estudo.

Posteriormente, com base nessa desagregação de consumos de energia identificaram-se possíveis medidas de melhoria para climatização, iluminação e produção de energia renovável. Após identificação, essas medidas de eficiência energética foram avaliadas, em separado e em conjunto, relativamente à sua viabilidade energética (Figura 19).

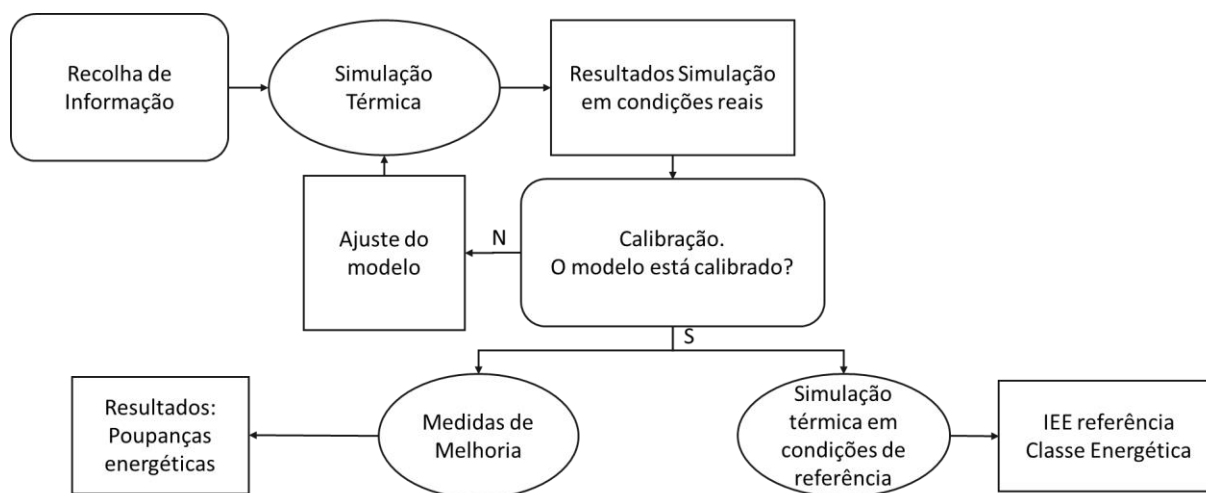


Figura 19 - Metodologia utilizada para a análise de consumo de energia

(Nunes et al. 2013) (Adaptado)

## 5.2 Modelação energética

A modelação energética refere-se à forma como foram inseridos os dados para efetuar a simulação dinâmica (qual a sua origem e alguns dos valores utilizados) e ainda a forma como parte dos resultados foi processada para obter os valores finais.

### 5.2.1 Condições reais e previstas

A análise de consumo de energia foi realizada a partir do modelo de simulação desenvolvido em *EnergyPlus*. Começou-se por construir um modelo geométrico através do programa *Sketchup* e do *plugin OpenStudio*. O *Sketchup* é um programa de desenho assistido por computador (DAC) que permite o desenho de geometria em três dimensões. O *plugin OpenStudio* permite estabelecer a ligação do *Sketchup* com o *EnergyPlus* através do desenho de zonas térmicas e da criação do ficheiro IDF que servirão de parâmetros de entrada para o *EnergyPlus*.

O critério de divisão de zonas baseou-se no tipo de uso do espaço. Quando uma mesma tipologia foi identificada em zonas adjacentes com a mesma orientação essas zonas foram agrupadas. Por exemplo, as zonas a verde do 301 ao 317 (Figura 20) definem gabinetes individuais com o mesmo perfil energético e mesma orientação pelo que foram reduzidos a uma mesma zona térmica – 3GabEste (Figura 21). No total, o modelo geométrico foi dividido em 44 zonas (Figura 23).

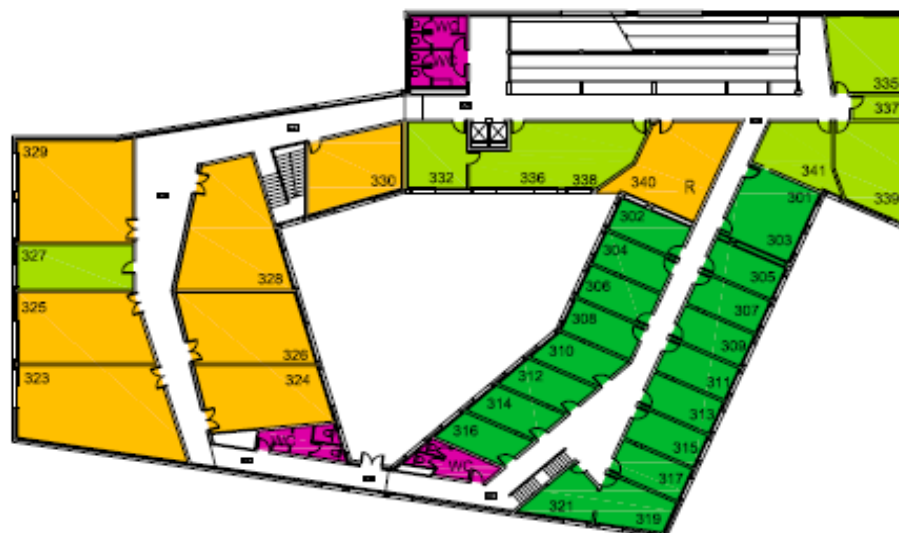


Figura 20 - Planta exemplo original com marcação da tipologia dos espaços por cor

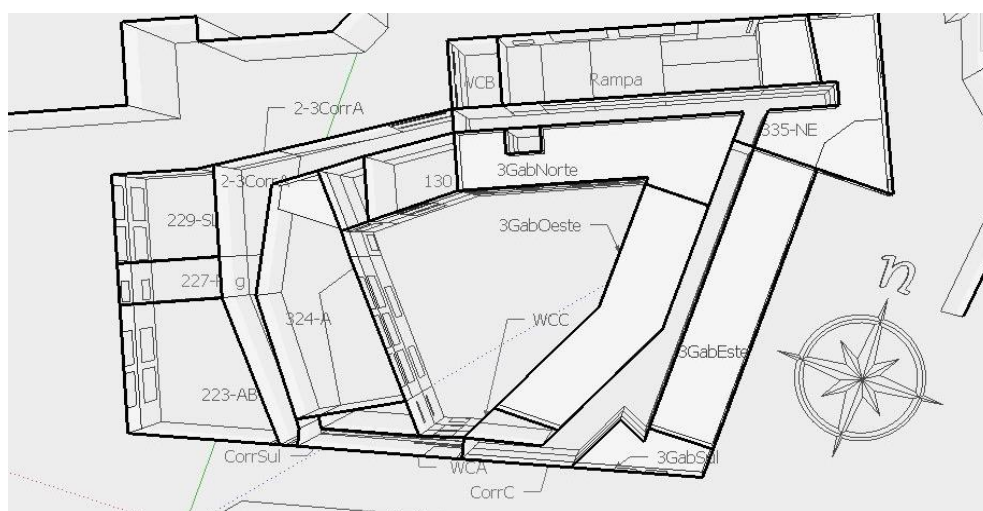


Figura 21 - Planta do modelo construído com divisão das zonas térmicas

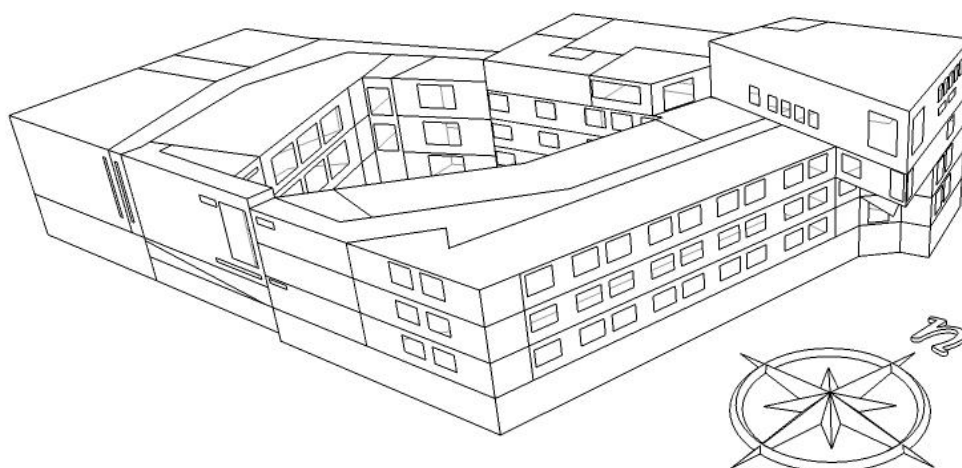


Figura 23 - Modelo geométrico

A envolvente foi caracterizada através dos valores de condutividade, densidade e calor específico dos materiais existentes na envolvente opaca e envidraçada (Anexo 10.1). As condições climáticas foram definidas através do ficheiro climático para a zona de Lisboa disponibilizado pelo LNEG (LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia n.d.).

A modelação das superfícies em contacto com o solo foi realizada segundo o método *alternative approach* de transferência de calor do solo da equipa de Mateus (Mateus et al. 2014). Este método consiste no acrescento de 30 cm de enrocamento à construção em contacto com o solo e posteriormente a uma camada de solo com uma espessura tal que a soma da camada de enrocamento com a constituição da superfície horizontal do edifício perfaçam 2 metros de profundidade. Através das temperaturas do solo a 2 metros de profundidade fornecidas pelo ficheiro climático, define-se o valor de temperatura do solo no programa de simulação (*Site:GroundTemperature:BuildingSurfaces*).

As cargas de aquecimento e arrefecimento foram calculadas através do objeto *HVACTemplate:ZoneIdealLoadsAirSystem*. Este objeto permite quantificar a carga térmica necessária para manter o espaço a uma temperatura de conforto interior definida. No tratamento de resultados o resultado das cargas de climatização foi dividido pelo COP definido pelas equações 12 e 13 (Carrilho da Graça et al. 2012).

$$COP_{aquecimento} = \psi \times \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad [12]$$

$$COP_{arrefecimento} = \psi \times \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad [13]$$

Em que  $COP$ , designa o coeficiente de desempenho da máquina,  $\psi$ , eficiência do sistema de climatização,  $T_{cond}$ , a temperatura de condensação (K),  $T_{evap}$ , a temperatura de evaporação (K). Os parâmetros das duas equações apresentam-se na Tabela 4. As temperaturas de conforto interior,  $T_{int}$ , foram definidos em 20°C para estação de aquecimento e 25°C para estação de arrefecimento. A temperatura exterior horária foi fornecida pelo ficheiro climático.

Tabela 4 - Parâmetros usados para cálculo das cargas elétricas de climatização

	Aquecimento	Arrefecimento
$T_{dist}$	45	5
$T_{cond}$	$T_{dist} + 5$	$T_{ext} + 5$
$T_{evap}$	$T_{ext} - 5$	$T_{ext} - 5$
$\psi$	40%	
Perdas distribuição	10%	

O caudal de ventilação de cada espaço foi definido através do projeto de ventilação do edifício e definido o valor absoluto por zona. Caso o sistema de ventilação do espaço não estivesse disponível (em períodos

noturnos sem ocupação por exemplo) foi considerado um caudal de infiltração de uma renovação por hora (RPH). Em espaços sem climatização ou sem ventilação mecânica foi considerado o mesmo valor.

Para equipamentos foi considerada uma fração radiante de 30%, para ocupantes de 40% e para iluminação de 72% (EnergyPlus 2009). A cada pessoa foi atribuído um nível de atividade típico de trabalho em escritório (sentado) com 100W (ASHRAE 2004). Para equipamentos elétricos do edifício foram considerados os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Potência definidas para equipamentos elétricos

Equipamento	Potência	Unidades	Referência
<b>Computador</b>	107	W	(ASHRAE Handbook - Fundamentals 2009)
<b>Projector</b>	300	W	(Thewes et al. 2014)f
<b>Impressora</b>	700	W	(ASHRAE Handbook - Fundamentals 2009)
<b>Elevador</b>	3300	W	(OTIS n.d.)
<b>Servidor</b>	2900	W/m <sup>2</sup>	(Ham et al. 2015)
<b>Cozinha</b>	1500	Wh/refeição	(Thewes et al. 2014)

Para o computador foi considerado 77 W de potência do sistema de processamento associado a 30 W de consumo do monitor. Para o elevador estabeleceu-se uma capacidade de 4 passageiros com motor de tração a duas velocidades. Para cozinha considerou-se o estudo suíço que aponta para valores entre 2.3 e 3.1 kWh/refeição e estabeleceu-se que cada refeição demora 30 minutos a preparar pelo que o valor inserido é de 1500 W/refeição ou seja 1500W/pessoa.

Os horários de ocupação foram definidos em períodos de 24 horas (de ocupação, iluminação, equipamento, sistemas de climatização e ventilação) para dias de semana, sábados, domingos (Tabela 6). O período de funcionamento do edifício é constante ao longo do período letivo com redução de atividade durante períodos de férias escolares ou cessação de atividade em períodos de fecho da instituição (horário igual a domingo).

Tabela 6 - Horário de ocupação, iluminação e equipamento elétrico

Dia		Útil						Sábado		Domingo
Horário		00:00	08:00	12:00	13:00	18:00	22:00	09:00	14:00	00:00
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		08:00	12:00	13:00	18:00	22:00	24:00	14:00	24:00	24:00
<b>Salas de Aula</b>	Ocupantes	0	0.7	0.3	0.7	0.4	0	0.4	0	0
	Equipamento	0	0.7	0.3	0.7	0.4	0	0.4	0	0
	Iluminação	0	0.7	0.3	0.7	0.4	0	0.4	0	0
<b>Gabinetes</b>	Ocupantes	0	0.9	0.5	0.9	0	0	0	0	0
	Equipamento	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0
	Iluminação	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0
<b>Circulação</b>	Iluminação	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0

Para a modelação dos ventiladores, foi considerado que estes funcionavam a 90% da potência nominal durante 3900 horas por ano. As bombas de circulação tem um horário de funcionamento igual às necessidades de cargas térmicas para aquecimento ou arrefecimento (3900 horas anuais).

Para simulação em condições previstas, foram usados todos os parâmetros descritos anteriormente com exceção do caudal de ar novo inserido no espaço. Os caudais de ar novo foram contabilizados por ocupante e não por zona. Quando o caudal de ar novo de projeto era inferior ao mínimo exigido por lei, foi considerado o maior valor.

### 5.2.1 Condições de referência

Para a modelação em condições de referência, as características alteradas incidiram sobre envolvente, iluminação, climatização e ventilação. Na envolvente, foram incluídas as condutividades de referência para a zona climática do edifício (Tabela 7).

Tabela 7 – Coeficientes de transmissão térmica para condições de referência segundo RECS

<b>Zona Correte da Envolvente</b>	<b>Coeficiente de Transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>°C)</b>
<b>Elementos opacos verticais exteriores ou interiores</b>	0.70
<b>Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores</b>	0.50
<b>Vãos envidraçados exteriores (portas e janelas)</b>	4.30

Na iluminação, os valores de potência foram alterados para respeitar o mínimo de luminosidade exigido pela Norma Europeia 12464-1 e RECS (Tabela 8). Na climatização foram alterados valores de eficiência das máquinas e na ventilação foi alterado o caudal de ar novo a entrar nos espaços (Tabela 9).

Tabela 8- Densidade de potência por tipologia

<b>Tipos de espaço</b>	<b>Densidade de Potência (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Estacionamento</b>	4
<b>Inst. Sanitárias</b>	9
<b>Salas de Aula</b>	14
<b>Auditório</b>	14
<b>Átrio entrada</b>	9
<b>Áreas de circulação</b>	5
<b>Escadas</b>	7
<b>Biblioteca espaço leitura</b>	14
<b>Cantina</b>	8
<b>Cozinha</b>	20

O caudal de ar novo foi calculado por espaço com base no valor por ocupante e com base no valor por unidade de área (Tabela 9), com uma eficácia de 0.8. O maior dos dois valores foi inserido no modelo de simulação. O método é descrito na portaria nº 353-A/2013.



Tabela 9 - Valores de referência para a) eficiência equipamento de climatização b) caudal de ar novo

Classe C	Chiller	Portaria n.º 353-A/2013:	Caudal prescrito
COP	2.9	Salas de Aula e Gabinetes	24 m <sup>3</sup> /h/ocupante
ERR	2.8	Auditórios	20 m <sup>3</sup> /h/ocupante
Tabela P-349D	1.17	Unidade de Área	3 m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>

Para o consumo energético dos ventiladores considerou-se um consumo de 2000 W/m<sup>3</sup>/s, que foi multiplicado pelo resultado fornecido pelo objeto *output Zone Mechanical Ventilation Standard Density Volume Flow Rate [m<sup>3</sup>/s](Hourly)*.

### 5.3 Potencial fotovoltaico

A metodologia para avaliar a potencialidade de instalação de um sistema fotovoltaico consistiu em diferentes etapas (Figura 24). Na primeira avaliou-se o potencial físico do local. Através da ferramenta *PVGIS* extraíram-se os dados de irradiação anual por unidade de área. Para este trabalho utilizou-se a informação a partir de imagens satélite, uma vez que são mais recentes. De seguida estudou-se o potencial geográfico do local. Através de informação disponibilizada ou visitas às coberturas dos edifícios em questão estabeleceu-se a área disponível para instalação. Essa informação foi incluída num modelo 3D das coberturas desenhado no *software Sketchup*.

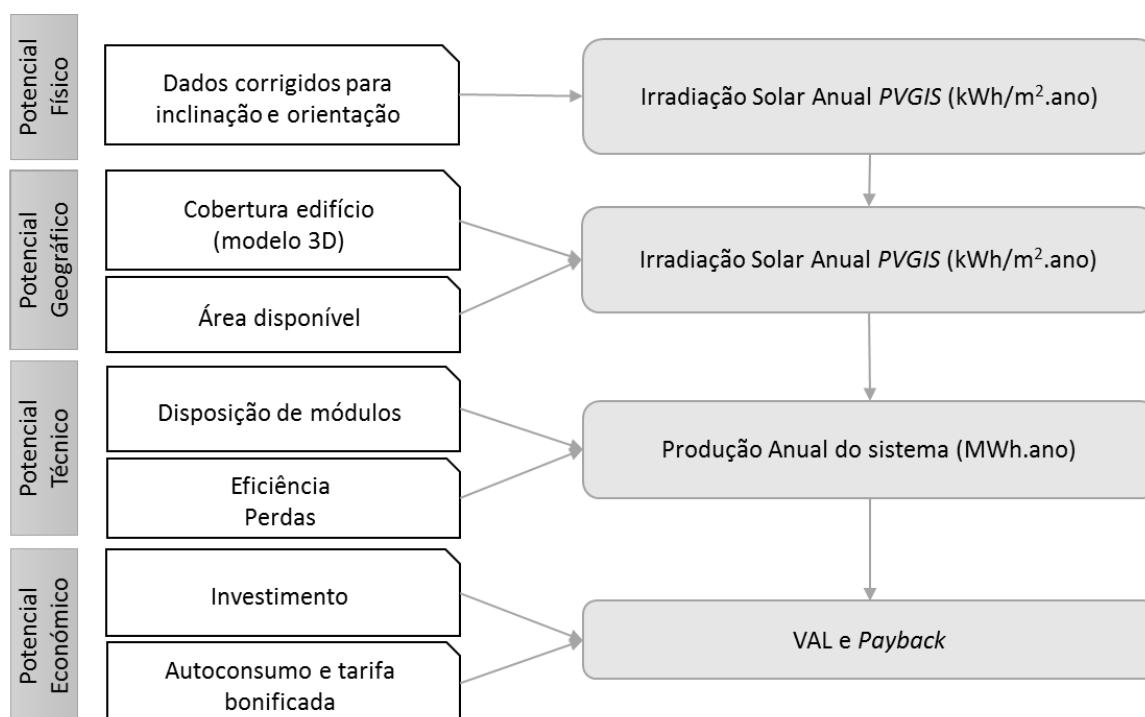


Figura 24 – Metodologia utilizada para avaliar o potencial solar fotovoltaico

(Adaptado de (Izquierdo et al. 2008))

Na terceira etapa avaliou-se o potencial técnico. A partir do modelo 3D realizou-se a distribuição dos módulos fotovoltaicos.

Para avaliar a produção anual definiu-se:

- Um módulo de silício multicristalino de 1.65 m<sup>2</sup>, com área de captação de 1.46 m<sup>2</sup>, potência de 250 Wp e eficiência de 15% (Bisol Group 2014). A escolha desta tecnologia relaciona-se com o preço competitivo e disponibilidade no mercado.
- Uma distância de segurança de 1 metro em relação ao limite da cobertura, de modo a manter um perímetro de segurança para circulação.
- A existência de 30% de perdas de sistema (Anexo 10.2). Este valor inclui perdas por inversores, cabos, reflexão, temperatura e baixa irradiância. Em conjunto com a eficiência de conversão do painel perfaz uma eficiência do sistema de 11%.

A produção fotovoltaica foi estimada a partir da equação 14.

$$E_{\text{sistema PV}} = I_{\text{PVGIS Anual}} \times A_T \times \eta_{\text{módulo}} \times (1 - \text{Perdas}_{\text{sist}}) \quad [14]$$

Sendo:  $I_{\text{PVGIS Anual}}$ , irradiância anual,  $A_T$ , área total de captação dos módulos instalados,  $\eta_{\text{módulo}}$ , eficiência do módulo (15%),  $\text{Perdas}_{\text{sist}}$ , perdas do sistema fotovoltaico (30%).

O inversor foi escolhido com base no conjunto de módulos que serve (Anexo 10.3). Assim os inversores escolhidos apresentam os valores apresentadas na Tabela 10. Os inversores apresentados são trifásicos sem transformador.

Tabela 10- Valor de inversores selecionados

Potência (kW)	Preço (€)	Preço por un. de Potencia (€/W)
10	1900	0.19
12	2100	0.18
15	2700	0.18
17	3700	0.22
Preço Médio		0.20

O preço dos módulos e inversores foi obtido através da consulta do catálogo de *Alma Solar Shop* (ALMA SOLAR n.d.). Para os restantes componentes estabeleceram-se percentagens de custo com base em orçamento obtido junto de um operador de mercado (Tabela 11).

Tabela 11 - Custos considerados para o sistema fotovoltaico

Componente		Valor de custo	
Sistema	Módulo	0.72	€/Wp
	Inversor (valor médio)	0.20	€/W
	Cabos e outros	11%	Custo módulo e inversor
Estrutura		11%	Custo sistema
Instalação		14%	Custo sistema e estrutura

Definido o investimento, avaliou-se a mais-valia financeira ou receita obtida pelo sistema para o caso de estudo em Portugal de três formas:

1. Autoconsumo:
  - a. Caso a produção exceda o consumo, a venda à rede é feita com uma tarifa de 46€/MWh;
  - b. A economia obtida deriva do valor de venda de eletricidade em período de cheia e ponta (horário de produção do sistema fotovoltaico). O valor médio é de 103 €/MWh;
  - c. Não foram considerados custos de ligação nem custos associados à compensação de CIEG. Apenas foi contabilizado o desconto de 10% de custo de rede quando a energia era vendida à rede.
2. Minigeração 2014:
  - a. Teve-se em conta uma tarifa de 106 €/MWh com base no despacho da Direção Geral de Energia e Geologia de 2013 para o ano de 2014, com depreciação anual de 7% durante 15 anos.
3. Minigeração 2011:
  - a. Reconheceu-se uma tarifa de 250 €/MWh, igualmente com depreciação de 7% ao ano durante 15 anos.

Para o caso de estudo em Moçambique, definiu-se que toda a eletricidade produzida era comprada ao mesmo preço de venda (66 €/MWh) (IRENA 2012).

## 5.4 Análise financeira

A seleção das medidas de renovação consiste numa relação entre investimento de capital e a eficiência das poupanças energéticas obtidas. O «Nível ótimo de rentabilidade», definido na EPDB-2010 da União Europeia, inclui o desempenho energético que leva ao custo mais baixo durante o ciclo de vida económico estimado. O custo mais baixo é determinado tendo em conta os custos de investimento, de manutenção e de funcionamento relacionados com a energia (incluindo custos e poupanças de energia, a categoria do edifício em causa e as receitas resultantes da energia produzida), quando aplicável, e os custos de eliminação, quando aplicável. O nível ótimo de rentabilidade situa-se dentro dos níveis de desempenho se a análise de custo-benefício calculada em função do ciclo de vida económico estimado for positiva. Para avaliar o nível ótimo de rentabilidade foram usados parâmetros económicos como:

- Valor Atual Líquido (VAL) estabelece o valor no final do tempo de vida do projeto. Se este valor for positivo o projeto é viável (equação 15).

$$VAL = \sum CF_n \quad [15]$$

Em que  $CF_n$ , representa o *cash-flow* no ano  $n$ , ou seja, o balanço entre a receitas e as despesas obtidas nessa ano.

- *Payback* – Retorno de Investimento, período de tempo necessário para recuperar o custo de um investimento. Este indicador é importante na tomada de decisão uma vez que longos períodos de tempo não são desejáveis para implementar um projeto.

O cálculo do *cash-flow* anual foi calculado com base na equação 16.

$$CF_n = E_n - R_n \quad [16]$$

Onde se caracteriza no ano  $n$ , *cash-flow* ( $CF_n$ ), valor do empréstimo em dívida ( $E_n$ ) e receita anual ( $R_n$ ).

O custo de empréstimo a amortizar no ano seguinte foi calculado com base na equação 17.

$$E_{n+1} = E_n \times (1 + c_{invest}) \quad [17]$$

Em que cada  $E_{n+1}$  define o empréstimo a amortizar no ano seguinte,  $E_n$  o empréstimo a amortizar no ano atual e  $c_{invest}$ , a taxa de custo de investimento.

A análise económica foi delineada para um horizonte de 20 anos. O preço da eletricidade foi considerado constante ao longo do tempo de vida. O custo de investimento foi estabelecido em 5% para Portugal (Banco de Portugal e Banco Central Europeu 2015) e 7.5% para Moçambique (Banco de Moçambique 2015). Não foram consideradas perdas de eficiência, custos de manutenção ou custos de eliminação.

## 6 Análise de consumos energéticos de um edifício do campus ISCTE

### 6.1 Descrição do edifício

O edifício em estudo encontra-se situado no campus universitário do ISCTE-IUL num dos limites da cidade universitária que compreende a Avenida das Forças Armadas em Lisboa. Este campus é constituído por quatro edifícios (Figura 25): Edifício I (mais antigo), Edifício II (de maior dimensão), Aula Autónoma (edifício em questão) e INDEG.



Figura 25 – Complexo universitário do ISCTE-IUL (Bing Maps 2015)

A Ala Autónoma está dividida em três corpos: A, B e C. O corpo A serve 17 salas de aula e dois auditórios. Os corpos B e C constituem os gabinetes tanto de pequena dimensão, com duas pessoas, como coletivos, com mais de 2 pessoas (78 espaços). O piso 4 do corpo B aloja uma área de restauração e uma biblioteca, o Clube ISCTE. Neste edifício o sistema de climatização é composto por bombas de calor, pelo que os seus consumos são apenas elétricos.

### 6.2 Calibração do modelo de simulação dinâmica e desagregação do consumo de energia

Através do levantamento local, das características dos equipamentos e do modelo geométrico construído, foi possível prever o consumo do edifício em condições reais de utilização. A calibração deste modelo foi feita através da comparação entre os resultados de simulação e as faturas de energia mensais registadas (desvio). Pela Figura 26, observa-se que a maior diferença entre o valor da fatura de

energia e o valor simulado acontece no mês de Outubro, Novembro e Dezembro. No resto do ano, o comportamento obtido por simulação é semelhante ao comportamento que as faturas de energia apresentam, com desvios inferiores a 12% com os meses de Abril e Junho a apresentar resultados inferiores a 5%. A nível anual, obteve-se um desvio absoluto de 12% relativamente ao consumo energético contabilizado.

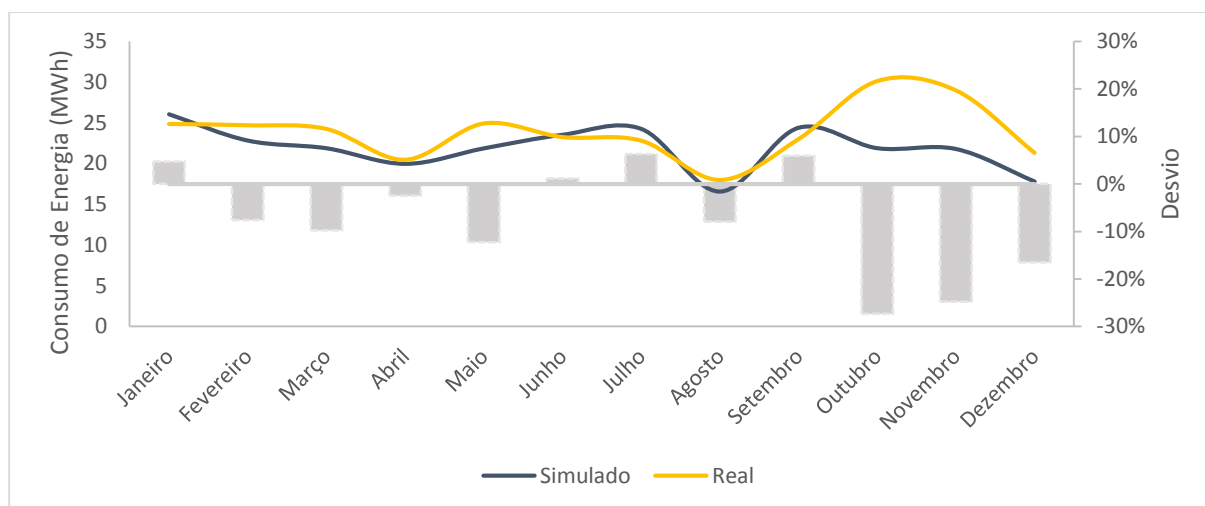


Figura 26 - Comparação entre resultados simulados e reais

Os resultados do modelo de simulação calibrado definem a desagregação de consumo energético apresentada na Figura 27.

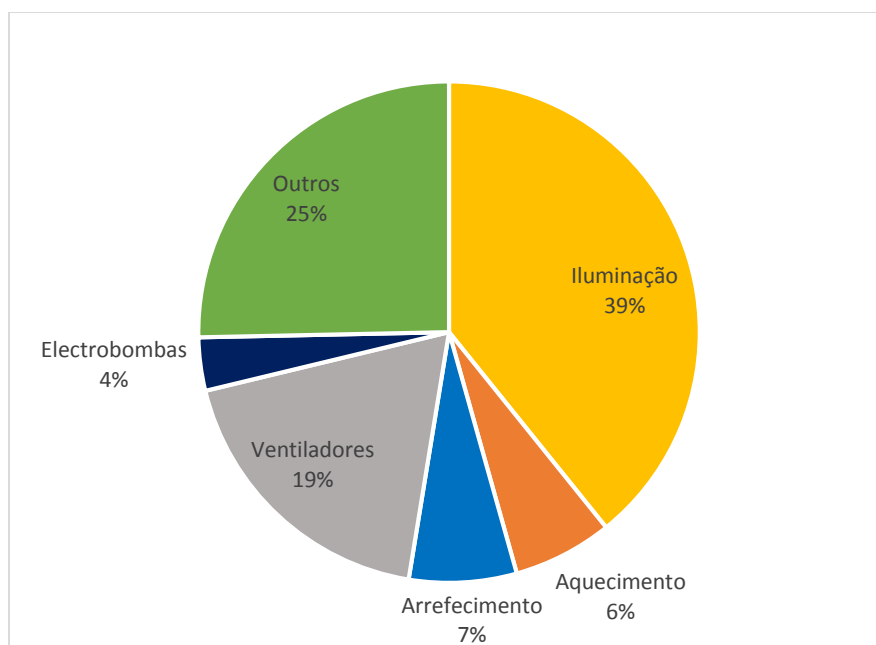


Figura 27 – Desagregação anual de consumos energéticos obtida por simulação

Daqui denota-se que o maior consumo de energia é a iluminação. A climatização que engloba bombas de circulação, ventiladores e cargas de arrefecimento e aquecimento perfaz 36% do consumo anual. Na climatização, observava-se que o maior consumo não se aplica às máquinas de climatização (cargas de

aquecimento, 6%, e arrefecimento, 7%) nem às bombas de circulação (3%) da rede hidráulica mas aos ventiladores de ar (19%). A parcela outros, que inclui os equipamentos elétricos como computadores, impressoras, elevadores e equipamentos de cozinha representa 24% do consumo elétrico. A partir desta divisão de consumo de energia foi possível classificar energeticamente o edifício e encontrar possíveis medidas de melhoria a aplicar na climatização, iluminação e produção renovável.

### 6.3 Consumo de energia em condições previstas e de referência

A Figura 28 apresenta os consumos anuais do modelo de simulação em condições previstas e de referência.

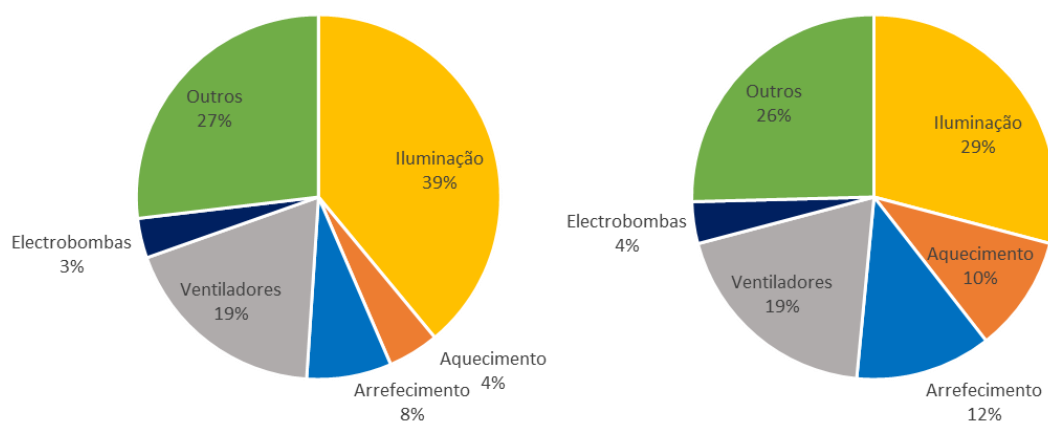


Figura 28 - Consumo Anual para condições previstas (esquerda) e de referência (direita)

Em condições de referência demonstra-se que o consumo de iluminação sofre uma redução o que aponta para o potencial de melhoria nesta área de consumo. As cargas de aquecimento e arrefecimento sofrem um aumento uma vez que os caudais de insuflação no espaço são superiores em condições de referência o que requer uma maior necessidade de climatização dos espaços para manter as temperaturas de conforto.

### 6.4 Indicador de eficiência energética e classe energética

Uma vez obtidos os resultados para o modelo em condições previstas e de referência calcularam-se os indicadores necessários para a classificação energética do edifício ( $IEE_{pr}$  e  $IEE_{ref}$ ). A classe energética para o edifício é B-, com um  $R_{IEE}$  de 0.93. Este valor revela que este edifício apesar da classe obtida está mais próximo da classe C ( $R_{IEE} > 1.00$ ) do que da classe B.

Tabela 12 - Indicadores de Eficiência Energética

Indicador	Previsto	Referência
$IEE_s$	96	104
$IEE_T$	33	33
$IEE$	129	138
$R_{IEE}$		0.93
Classe		B-



Figura 29 - Classe Energética

## 6.5 Medidas Melhoria

Após a análise de consumos identificaram-se os pontos onde a poupança de energia pode ser obtida. Essas medidas incidem na alteração no sistema de ventilação de modo a recuperar o calor dos ventiladores de extração e voltar a injetá-lo no sistema de insuflação, na renovação do sistema de iluminação por tecnologias mais eficientes e na colocação de painéis fotovoltaicos no telhado do edifício.

### 6.5.1 Climatização

Para aplicar a medida de melhoria no sistema de climatização, é necessário compreender de que forma o sistema funciona. Os aparelhos de ventilação e climatização encontram-se na cobertura dos três corpos da forma espacial apresentada na Figura 30.



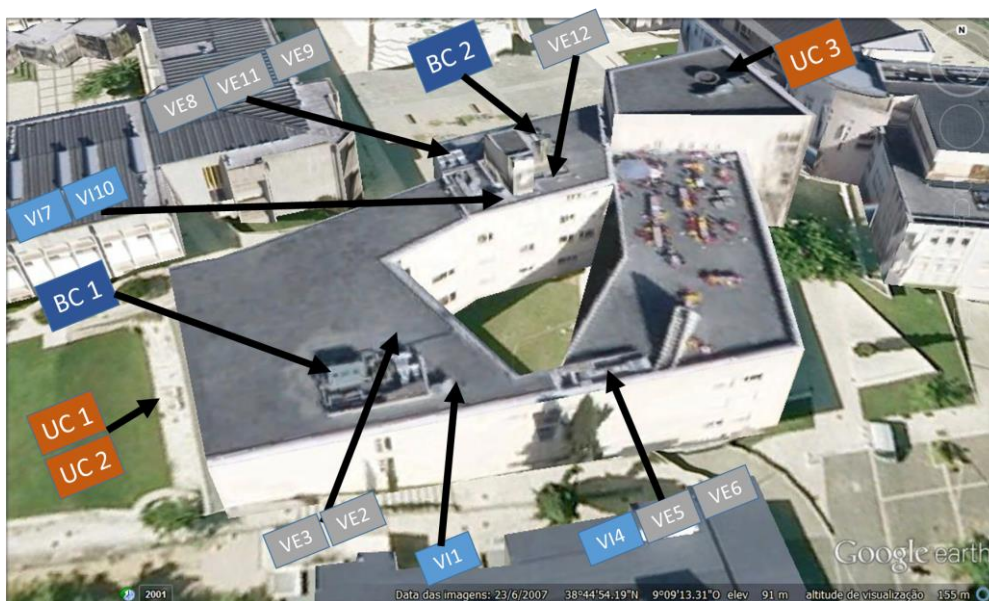


Figura 30 - Distribuição do sistema de climatização e ventilação (Google Earth)

A insuflação de ar é feita por ventiladores que servem pontos estratégicos do edifício (VI – Ventilador de Insuflação), sendo o ar posteriormente distribuído por cada espaço através do teto falso presente nos corredores. A extração é feita por ventiladores em instalações sanitárias e em corredores (VE – Ventilador de Extração). Cada corpo tem, para os 3 pisos, três ventiladores:

- Um de insuflação para o corredor;
- Um de extração do corredor;
- Um de extração das instalações sanitárias.

Existe também um ventilador de insuflação e outro de extração dedicado ao piso 4 do corpo B e ainda um de extração na zona de estacionamento do piso 0. No total são 13 ventiladores com potências variadas, o que perfaz uma potência de 13.5 kW.

Associado à circulação de ar está associado um sistema de climatização que é alimentado por bombas de calor centrais (BC1 e 2) que servem múltiplos espaços e unidades de climatização dedicadas (UC1, 2 e 3) que servem apenas um espaço como auditórios ou biblioteca.

O objetivo da recuperação de calor é aproveitar parte do ar extraído através de uma ligação entre o ventilador de extração e o ventilador de insuflação. Através do modelo de simulação em condições previstas definiu-se que existiria uma recuperação de calor sensível e latente com 70 e 65% de eficácia,

respetivamente.

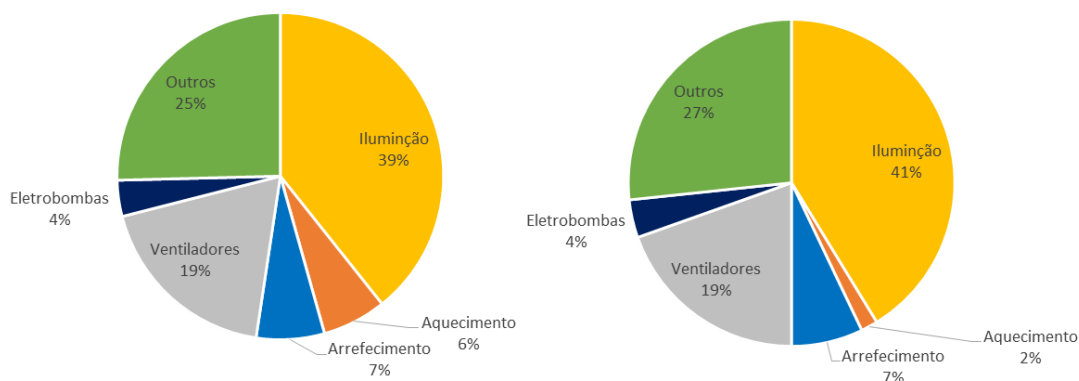


Figura 31 - Consumo anual sem aplicação da medida de melhoria (esquerda) e com aplicação da medida de melhoria (direita)

Como se pode verificar pela Figura 31, existe uma redução da carga de aquecimento de 4%. Em valores absolutos, esta redução traduz-se numa poupança energética de 12 MWh anuais de energia final. De notar que o consumo dos ventiladores se mantém inalterado, uma vez que estes continuaram a funcionar no mesmo período de tempo.

### 6.5.2 Iluminação

Da mesma forma que se procedeu para a climatização, caracterizou-se o sistema de iluminação presente no edifício. Através do levantamento local concluiu-se que a iluminação é constituída principalmente por lâmpadas FT8 (Fluorescente Tubular) nos gabinetes, salas de aula e corredores (Figura 32). As lâmpadas de halogéneo existem nos auditórios e biblioteca, sendo estas de alta potência (150W). Também existem em instalações sanitárias e em espaços de circulação aplicações de baixa potência (50W).

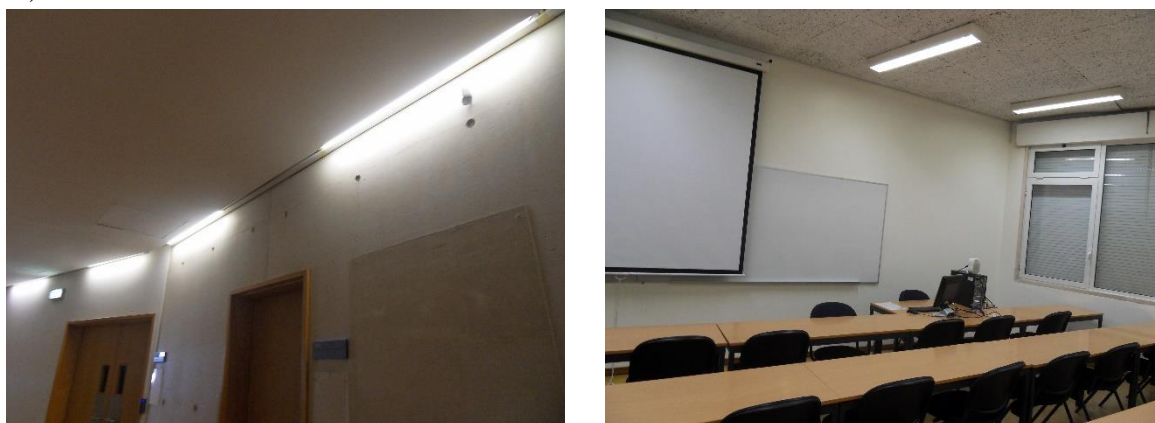


Figura 32 – Iluminação com FT8 em sanca no corredor (esquerda) e FT8 em sala de aula (50W) (direita)

Pela Tabela 13, conclui-se que as lâmpadas FT8 representam a maioria da potência instalada com 63%. As lâmpadas de halogéneo e fluorescente compactas representam 18% da potência instalada. Lâmpadas FT5 significam 1%.

Tabela 13 - Potência instalada por tecnologia

Tipologia	Potência Instalada (kW)	%
<b>FT8</b>	39	63%
<b>FT5</b>	1	1%
<b>FC</b>	3	18%
<b>Halogéneo</b>	23	18%
<b>TOTAL</b>	1 363	

Para uma renovação do sistema de iluminação considerou-se que as lâmpadas FT8 são substituídas por FT5 e as lâmpadas de halogéneo são substituídas por lâmpadas fluorescentes compactas ou LED, uma vez que são tecnologias que apresentam maior eficiência luminosa (lm/W) (PremiumLight n.d.). A aplicação desta medida traduz-se numa poupança de 60 MWh, que corresponde a cerca de 25% do consumo final anual de energia

### 6.5.3 Sistema fotovoltaico

Para a terceira medida de melhoria dimensionou-se um sistema fotovoltaico (Figura 33). Ao todo são 76 módulos, com 19 kWp de potência instalada. A azul delimita-se a área disponível. As áreas não disponíveis têm ocupação como equipamentos de climatização, caixa de elevadores, escadas e esplanada. Com a instalação prevista, a energia produzida seria de 25 MWh que corresponde a 9% do consumo do edifício.

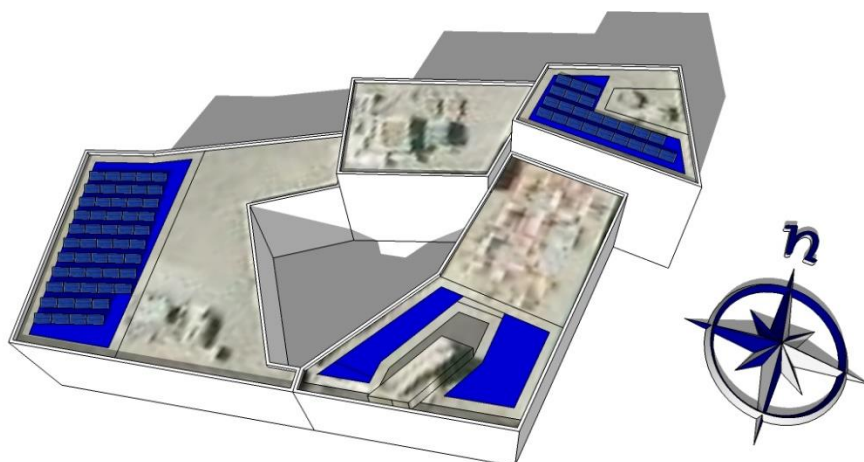


Figura 33 - Sistema fotovoltaico na Ala Autónoma (área a azul – área disponível)

### 6.5.4 Resultados da aplicação das medidas de melhoria

A aplicação das diferentes medidas de melhoria é apresentada na Figura 34. A alteração da iluminação existente apresenta-se como a medida de melhoria mais vantajosa na poupança energética final. A aplicação de um sistema fotovoltaico representa uma diminuição de 12% e a recuperação de calor apresenta 4% de redução. No total o potencial de redução energética é cerca de 40%.

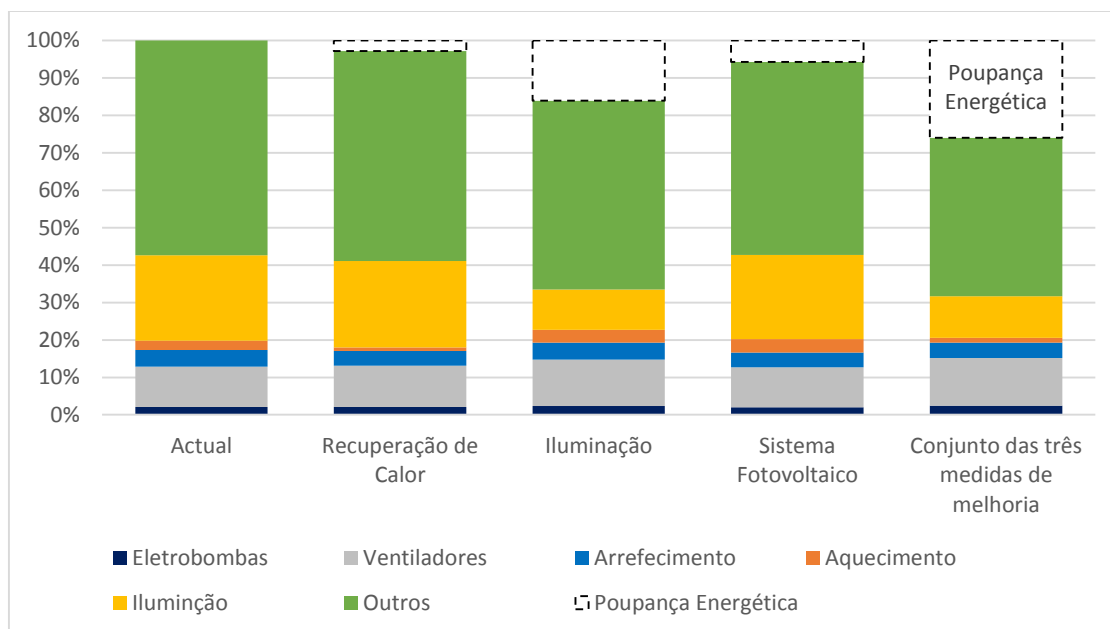


Figura 34 - Redução de consumo de energia pela aplicação das medidas de melhoria (energia anual)

De modo a contabilizar o efeito da implementação destas alterações na classe energética estudou-se qual a diferenciação que cada medida introduz no cálculo da classe energética do edifício (Tabela 14).

Tabela 14 - Classe Energética com aplicação de medidas de melhoria

	IEE <sub>s</sub>	IEE <sub>REF</sub>	IEE <sub>REN</sub>	R <sub>IEE</sub>	Classe
<b>Atual</b>	96	104	0	0.93	B-
<b>Recuperação de Calor</b>	92	104	0	0.88	B-
<b>Iluminação</b>	66	104	0	0.64	B
<b>Sistema Fotovoltaico</b>	98	104	13	0.82	B-
<b>Conjunto 3 medidas</b>	61	104	13	0.46	A

A recuperação de calor ou o sistema de produção renovável não têm impacto na classe, uma vez que a classe original se encontra muito próximo da classe C. Só uma medida com uma redução significativa do consumo, como o caso da renovação do sistema de iluminação, é que traduz alteração da classe energética. A aplicação das três medidas de melhoria permite obter uma classe A para o edifício.

## 7 Potencial Solar Fotovoltaico em meio universitário

### 7.1 Portugal

De modo a ter uma perceção global da produção de energia em meio universitário realizou-se o estudo para os quatro edifícios (Edifício I, Edifício II, Ala Autónoma e INDEG) do complexo ISCTE. A área de cobertura é de 9650 m<sup>2</sup>. Como primeiro passo avaliou-se qual o recurso solar existente no local. Através da plataforma *PVGIS* é possível aferir qual inclinação que maximiza a radiação incidente numa superfície. No caso estudado essa inclinação encontra-se entre 30 e 40 graus com uma orientação muito próxima do ponto Sul (Tabela 15). A orientação da maioria das coberturas do ISCTE é de 23°E, pelo que se revelou importante aferir qual a perda de recurso caso os módulos fossem orientados segundo a cobertura do edifício. Pela Tabela 15, observa-se que a perda de recurso é de cerca de 1% face ao caso ótimo (34° de inclinação).

Tabela 15 - Radiação Solar para Lisboa 38°N, 9°W, Elevação 88 m) (kWh/m<sup>2</sup>)  
(JRC's Institute for Energy and Transport and European Commission n.d.)

Inclinação	0	10	20	30	34	40	50
Azimute							
SSE (-23°)	1870	2000	2090	2140	2140	2130	2070
SUL (0°)	1870	2010	2110	2160	<b>2170</b>	2160	2100
SSW (23°)	1870	2000	2090	2130	2130	2120	2060

Para este caso de estudo, definiu-se que os módulos seriam colocados segundo a orientação da cobertura do edifício. Escolheu-se uma inclinação de 30° uma vez que as estruturas de suporte dos módulos apresentam esta inclinação e a perda do recurso solar não é significativa. Relativamente à orientação, optaram-se pelos valores de 2140 kWh/m<sup>2</sup> quando a disposição indicava 23°E e 2160 kWh/m<sup>2</sup> quando indicava 0°. A avaliação deste potencial solar requer a análise da área de cobertura disponível. Através de visitas ao local definiram-se as zonas passíveis de instalação do sistema fotovoltaico (Figura 35). Identificaram-se áreas com equipamentos de ventilação e climatização e que servem espaços de restauração (esplanadas) ou que se encontram sombreadas (Figura 36).



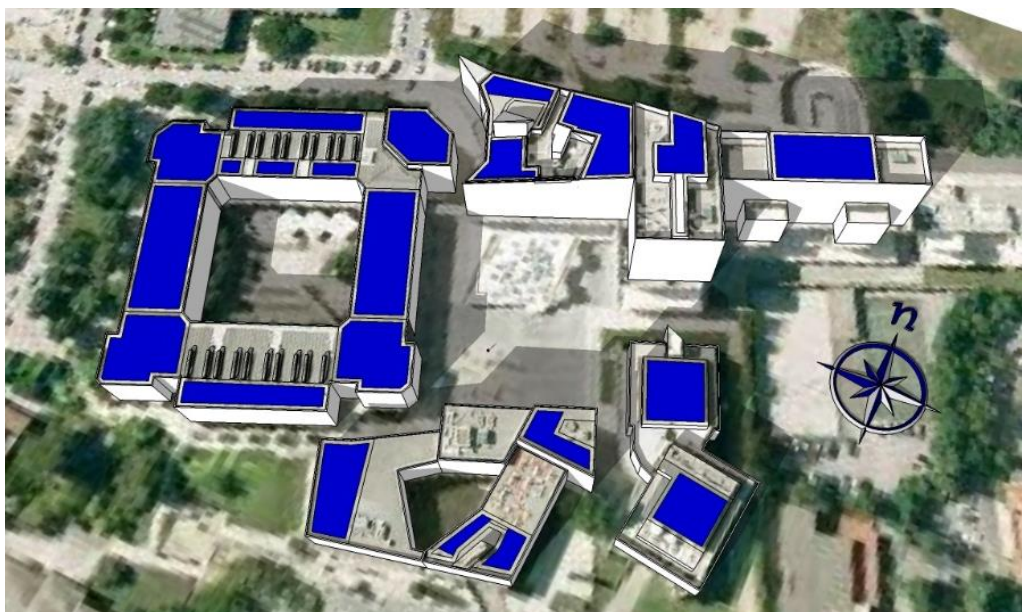


Figura 35 - Área de cobertura disponível

A Figura 36 demonstra que da área de cobertura disponível, 43% representa área já destinada a outros usos e 15% será área de segurança e manutenção. A área disponível para instalação do sistema fotovoltaico representa 42% da área total. No entanto a área disponível não se traduz em área de módulo pelo que é preciso estabelecer a distribuição dos módulos.

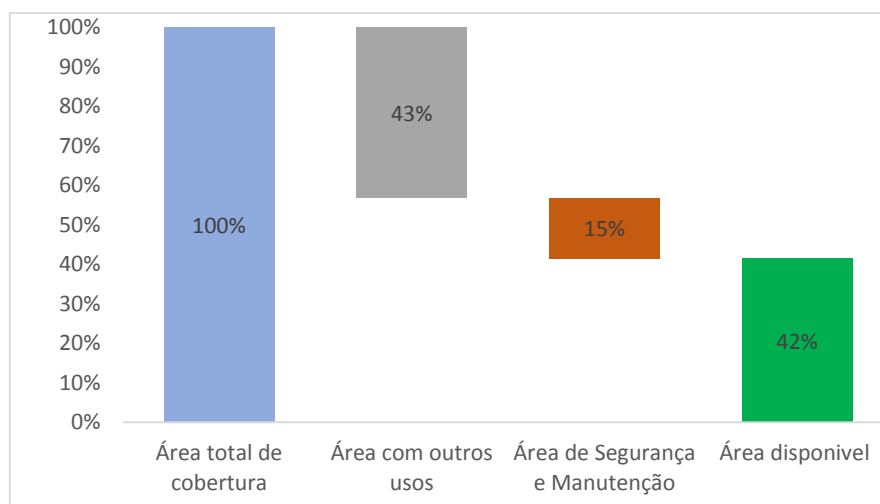


Figura 36 - Área disponível para implementação de módulos

A distribuição dos módulos foi realizada através do *plugin Skelion*. A Figura 37 apresenta uma distribuição possível dos módulos. No total 1 220 módulos podem ser instalados, perfazendo uma área de painel de 1 780 m<sup>2</sup> de área de captação solar (18% da área total de cobertura).



Figura 37 - Disposição de módulos com uma inclinação de 30°

Os valores de potência instalada e área de painel por edifício encontram-se na Tabela 16. O Edifício I é o que apresenta maior potência instalada com a energia produzida pelo sistema a representar 30% do consumo anual atual. No total este sistema fotovoltaico reduz o consumo de energia do *campus* proveniente da rede elétrica em 13%.

Tabela 16 - Produção de energia renovável por edifício

Edifício	Qtd. (un.)	Área (m <sup>2</sup> )	Potência instalada (kWp)	Produção Anual (MWh ano)	Consumo Elétrico Anual (MWh ano)	Percentage m de consumo suprido por PV
<b>Ed. I</b>	750	1 230	190	250	900	30%
<b>Ed. II</b>	270	450	70	90	1 620	10%
<b>AA</b>	80	130	20	30	290	10%
<b>INDEG</b>	120	200	30	40	290	10%
<b>TOTAL</b>	1 220	2 010	310	410	3 100	13%

Para o cálculo do investimento, recorreu-se aos valores apresentados na secção metodologia, e obteve-se uma estimativa para a instalação do sistema projetado anteriormente. De salientar que para o Edifício I, é necessário que haja uma reformulação da cobertura ou que seja instalado um suporte acima da cobertura existente, uma vez que esta apresenta uma estrutura com canaletes que não é compatível com a instalação de módulos fotovoltaicos. No entanto esta particularidade não foi considerada na avaliação de custos. Na Tabela 17 apresentam-se os valores de investimento para o sistema fotovoltaico. A maior percentagem do custo de investimento é apresentada pelos módulos fotovoltaicos.

Tabela 17 - Projeção de investimento por componente do sistema fotovoltaico

Componente	Valor (€)	Percentagem do investimento total
Módulos	220 000	59%
Inversores	51 000	14%
Cabos e Outros	30 000	8%
Estrutura	25 000	7%
Instalação	46 000	12%
Total	<b>372 000</b>	
Custo por Wp	<b>1.20 €/Wp</b>	

O investimento inicial será recuperado anualmente consoante a receita obtida. Para avaliação do sistema de remuneração adiante, importa saber em que alturas é que a produção do sistema é superior ao consumo de cada edifício. O *campus* dispõe dos valores de potência de 15 em 15 minutos para dois contadores: um que fornece o Edifício I, Ala Autónoma e INDEG e um segundo que fornece apenas o Edifício II. Através dessa informação avaliou-se os períodos em que a produção projetada foi superior ao consumo de anos anteriores. Para a produção fotovoltaica recorreu-se ao dia médio mensal do *PVGIS*, com intervalo de tempo de 15 minutos. A sua comparação em cada instante demonstrou que para o conjunto Edifício I, AA e INDEG a diminuição de consumo ao fim de semana leva a uma produção excessiva de energia renovável (Figura 38). Dias de feriados ou férias também são responsáveis por uma produção superior ao consumo. Nos dias úteis da pausa letiva de Agosto a produção não ultrapassa a energia consumida (Figura 39).

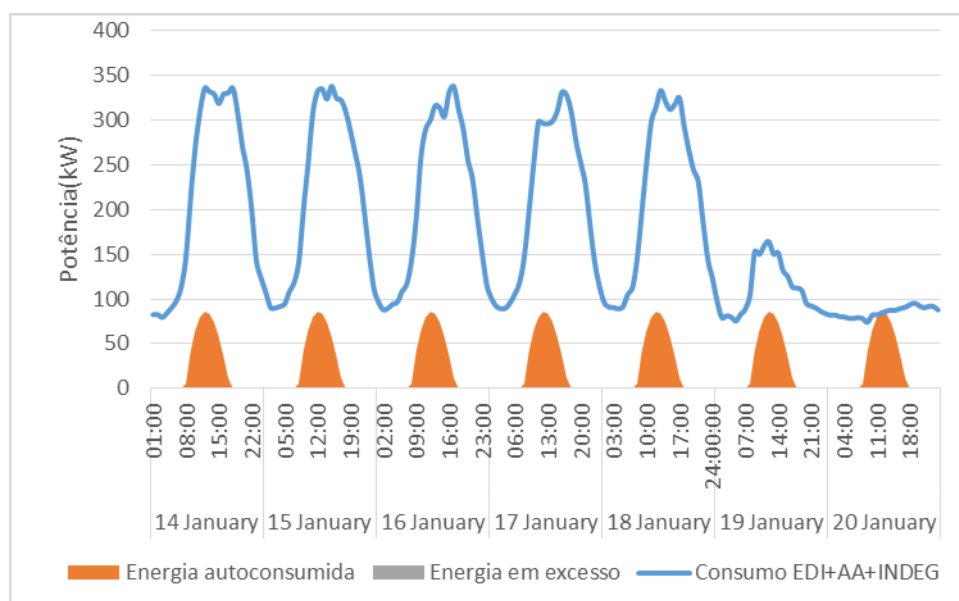


Figura 38 - Comparação produção e consumo em semana de Janeiro (Edifício I, AA e INDEG)



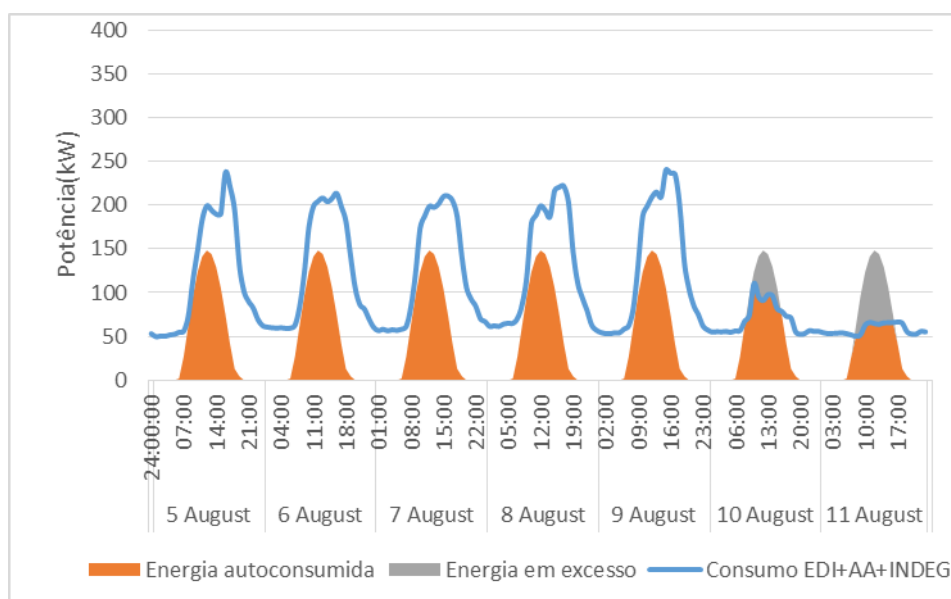


Figura 39 - Comparação produção e consumo em semana de Agosto (Edifício I, AA e INDEG)

Para o Edifício II, a produção não ultrapassa o consumo em nenhum período do ano (Figura 40). Os casos em que o consumo desce abruptamente devem-se a possíveis falhas na contagem de energia. No entanto para o Edifício I, AA e INDEG, a produção em excesso resulta em 20 MWh anuais de energia, que representa 4% da produção anual.

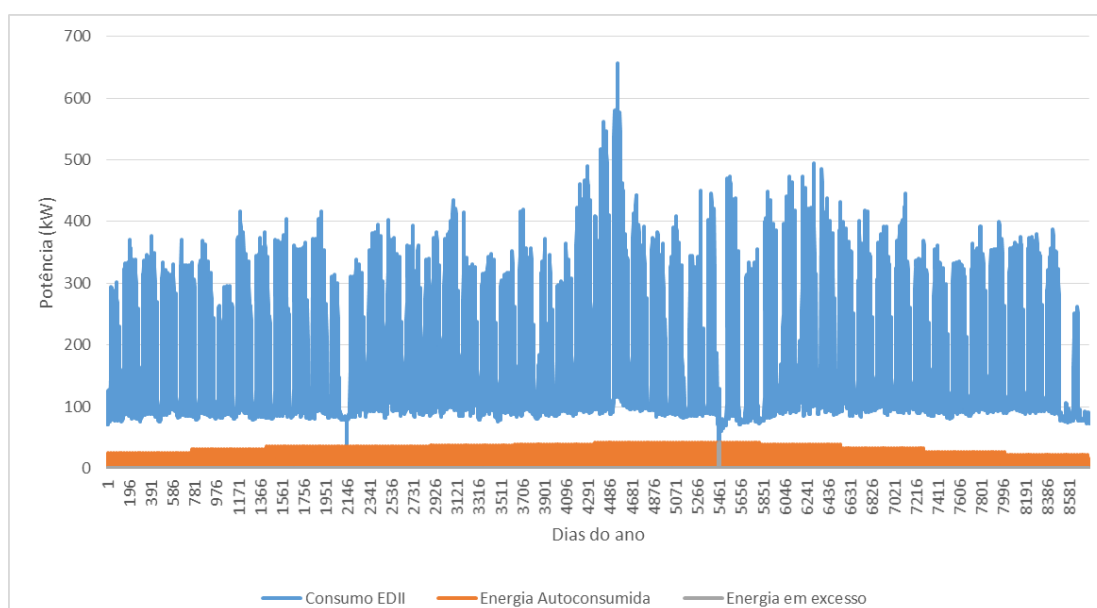


Figura 40 - Comparação produção fotovoltaica com consumo Edifício II

Uma vez avaliado o excesso de produção de energia, estudaram-se os três modos de retorno de investimento para o sistema fotovoltaico: Autoconsumo, Minigeração 2014 e Minigeração 2011 (Tabela 17). Para o primeiro obteve-se uma mais-valia financeira anual de 41 mil euros. Para o segundo um valor ligeiramente superior (43 mil euros). A Minigeração de 2011 tem um ganho anual de 102 mil

euros, principalmente devido à tarifa bastante superior, uma vez que esta procurava contrabalançar o custo elevado da tecnologia no período em que esteve em vigor.

Tabela 18 - Remuneração/Poupança anual do sistema fotovoltaico

Tipo de remuneração	Tarifa (€/MWh)	Tarifa Poupança (€/MWh)	Energia Rede (MWh ano)	Energia AC (MWh ano)	Remuneração Rede (€ ano)	Poupança AC (€ ano)	Total (€ ano)
<b>Autoconsumo</b>	46	103	20	390	600	40 500	41 200
<b>Minigeração 2014</b>	106	0	410	0	43 300	0	43 300
<b>Minigeração 2011</b>	249	0	410	0	101 700	0	101 700

Definida a mais-valia e o investimento necessários, importa analisar a sua viabilidade ao longo do tempo de vida do projeto, neste caso 20 anos (Figura 41).

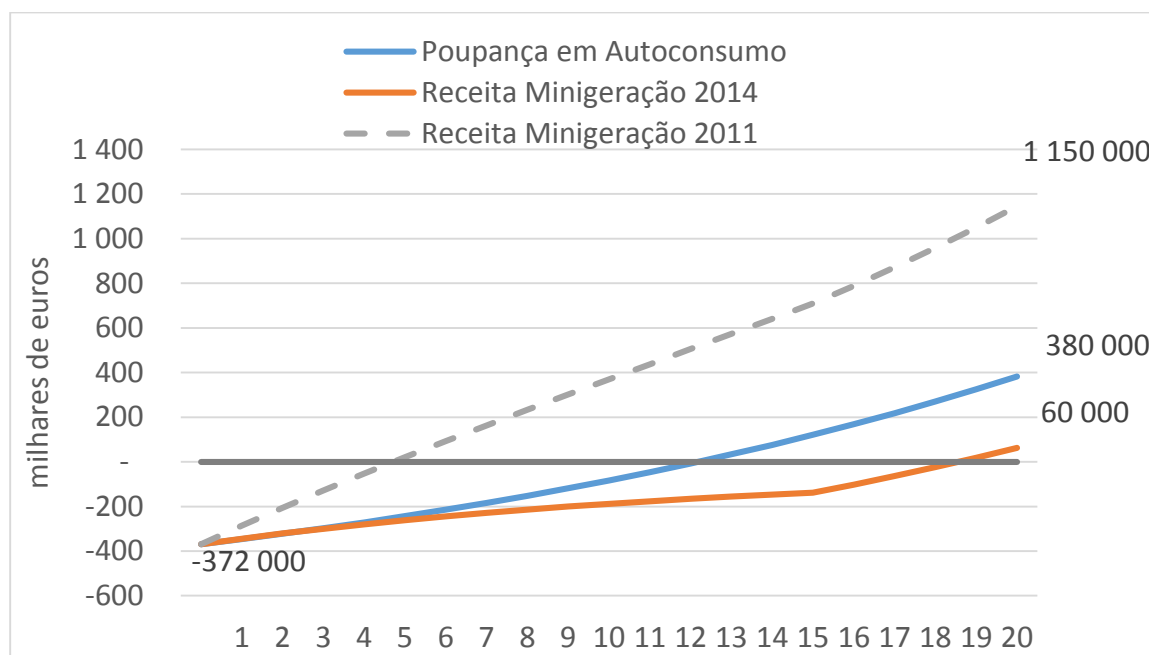


Figura 41 - Evolução financeira a 20 anos do sistema fotovoltaico

A Minigeração de 2011 demonstra ser a opção mais vantajosa com um *payback* de 5 anos. O Autoconsumo ao fim 13 anos compensa o investimento inicial. Ao fim de 20 anos estima-se uma poupança de 380 mil euros. A Minigeração 2014 é a menos favorável com um *payback* de 19 anos e um valor líquido de 60 mil euros.

No entanto, a recente implementação do sistema de autoconsumo apresenta algumas variáveis que carecem de um estudo mais aprofundado, como o efeito dos custos de CIEG, dada pela equação 10 e Tabela 2. Estudou-se a perda que a aplicação desse parâmetro teria na receita anual (Tabela 19). Demonstra-se que para uma representatividade de 1% das UPAC face ao sistema elétrico nacional, o sobrecusto do proprietário do *campus* estudado teria uma diminuição de 8% no final do ano face ao caso

estudado anteriormente. Caso essa representatividade fosse superior a 3% a perda atingiria os 14%, com uma redução de 5 700 euros.

Tabela 19 - Avaliação dos custos de interesse económico geral na mais-valia anual do sistema fotovoltaico

$P_{UPAC}$ (kWp)	$V_{CIEG_t}$ MT (€/kW/mês)	$K_t$	$C_{CIEG}$ (mensal)	$C_{CIEG}$ (anual)	Redução mais-valia Absoluta	Redução mais-valia
<b>310</b>	3.062	0%	0	0	41 200	0%
<b>310</b>	3.062	30%	285	3 417	37 800	-8%
<b>310</b>	3.062	50%	475	5 695	35 500	-14%

Neste caso revela-se que a aplicação desta compensação é penalizadora para um sistema de autoconsumo, que no pior dos cenários pode representar um valor monetário de 6 mil euros anuais, o que representa 14% da poupança obtida anualmente. A vinte anos, esta redução da receita reduz o VAL em 70 mil euros para 30% e 117 mil euros para 50% de  $K_t$ . O *payback* tem um agravamento de 1 ano para 30% e 2 anos para 50% face ao caso inicial (Figura 42).

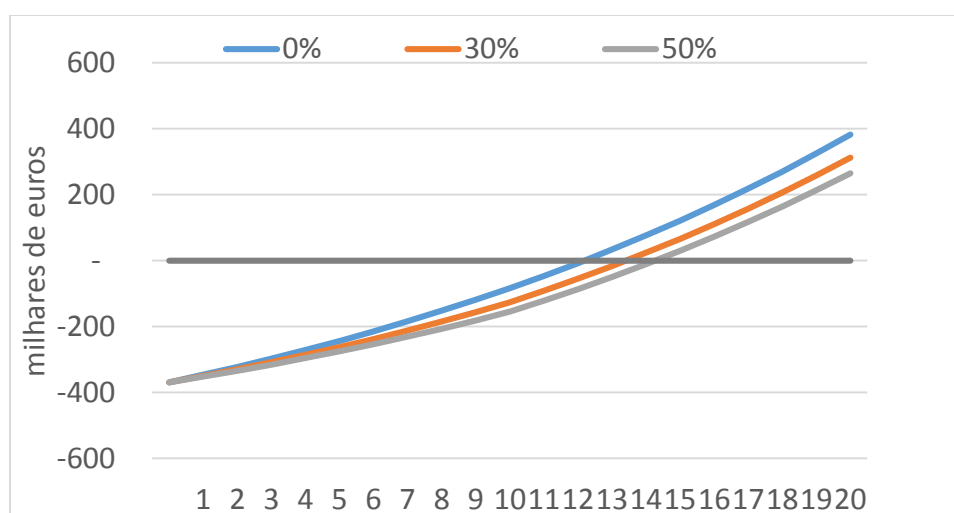


Figura 42 – Influência da compensação dos CIEG no VAL e *payback*

## 7.2 Moçambique

A projeção de sistemas fotovoltaicos na cobertura de edifícios pode ser aplicada em diferentes localizações. Revelou-se importante comparar o caso de estudo anterior com um segundo caso de estudo em que a localização e o tipo de coberturas fossem diferentes. Este caso, localizado em Moçambique, é constituído por três conjuntos de edifícios: Reitoria, Serviços Centrais e Complexo de Salas de Aula. A área de cobertura é de 5400 m<sup>2</sup> (Figura 43)

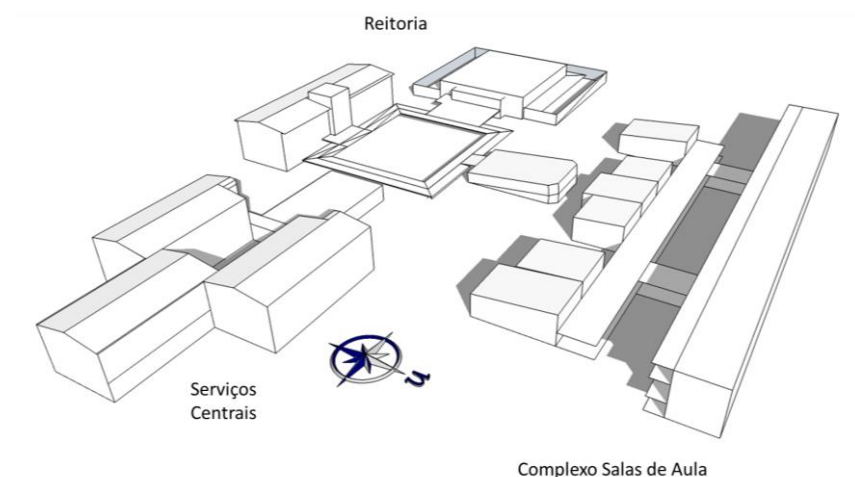


Figura 43 - Campus universitário em Moçambique

Começou-se por avaliar o recurso solar disponível. Na localização de Maputo, a posição que maximiza a exposição solar é a de uma superfície com  $29^\circ$  de inclinação, voltada a Norte como se pode verificar pela Tabela 20.

Tabela 20 - Irradiação anual de Maputo ( $25^\circ\text{S}$ ,  $32^\circ\text{E}$ , Elevação: 74 m) por unidade de área [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ] (JRC's Institute for Energy and Transport and European Commission n.d.)

Inclinação	0	10	20	30	34	40	50
<b>Azimute</b>							
<b>Norte</b>	1910	2020	2080	2100	2100	2070	1980

Pelos dados de irradiação observa-se que em relação ao caso ótimo, que apresenta irradiação anual máxima (orientação Norte, inclinação  $29^\circ$ ):

- Uma superfície horizontal perde cerca de 10% de irradiação anual
- Para a orientação Norte, a inclinação de  $10^\circ$  perde 4% da irradiação anual

Os resultados anteriores permitem identificar as soluções mais interessantes para instalação de tecnologias solares integradas na arquitetura, nomeadamente instalações complanares com a cobertura. Para este caso selecionou-se uma inclinação de  $30^\circ$  à semelhança do caso de estudo em Portugal, pela disponibilizada das estruturas de mercado apresentaram esta inclinação e pela perda de recurso solar não ser significativa. No caso em que as coberturas são inclinadas, foi adotada uma solução complanar com a mesma inclinação das coberturas ( $10^\circ$ ). Todos os módulos apresentam uma orientação de  $180^\circ$  de azimute - virados a Norte (Figura 44).

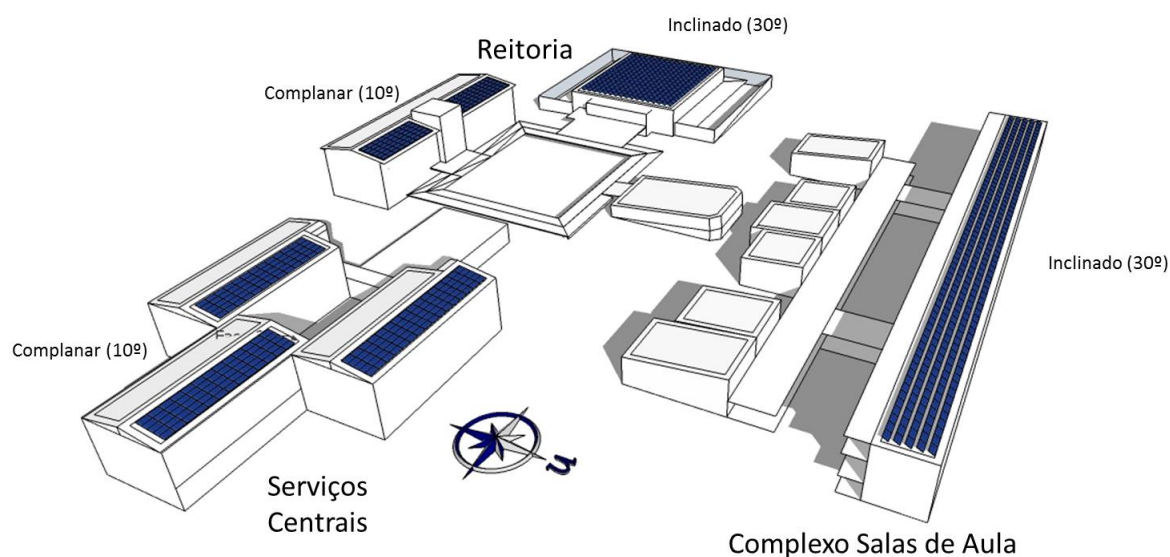


Figura 44 – Disposição do sistema fotovoltaico previsto

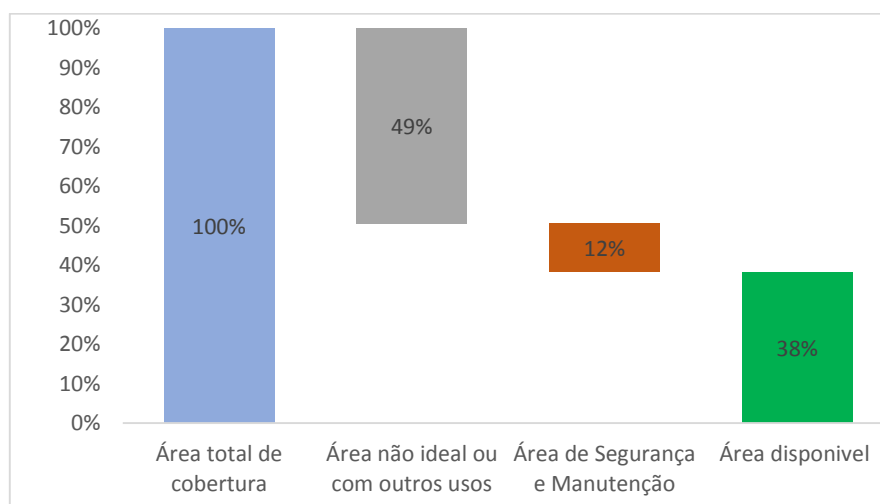


Figura 45 – Área disponível para instalação

Relativamente à área total de coberturas, 38% pode ser aproveitada para colocação de módulos (Figura 45). Na Tabela 21 são apresentados os números relativamente a área de módulo, potência instalada e produção anual. A área de módulo de 1 360 m<sup>2</sup> representa 28% da área total de cobertura.

Tabela 21 – Características do sistema por conjunto de edifícios

Edifício	Área módulo (m <sup>2</sup> )	Potência instalada (kWp)	Produção Anual (MWh.ano)
<b>Reitoria</b>	570	100	35
<b>Serviços Centrais</b>	310	50	170
<b>Complexo Salas de Aula</b>	480	80	125
<b>TOTAL</b>	1 360	230	330

A potência instalada deste sistema é de 230 kWp com produção anual de 330 MWh. O valor de investimento é de 304 mil euros, com a distribuição apresentada na Figura 46. À semelhança do caso em Portugal, os módulos apresentam o maior custo de investimento. Este sistema tem um custo de 1.30 euros/Wp.

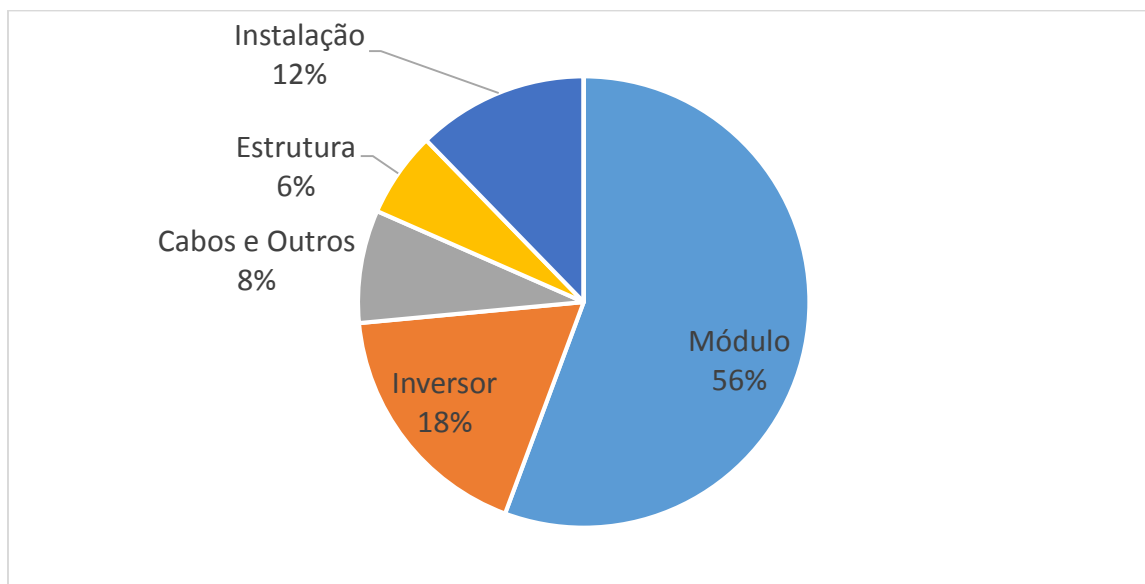


Figura 46 - Desagregação de investimento para um sistema de 230 kWp [%]

Considerando para o custo da eletricidade o valor indicativo de 66 €/MWh (IRENA 2012), a produção de 330 MWh/ano para o caso considerado corresponde a uma receita de 22 mil euros. Neste caso de estudo considerou-se que não existia qualquer tipo de tarifa bonificada sendo toda a eletricidade vendida à rede com o mesmo custo de compra. A taxa de juro foi fixada em 7.5% (Banco de Moçambique 2015).

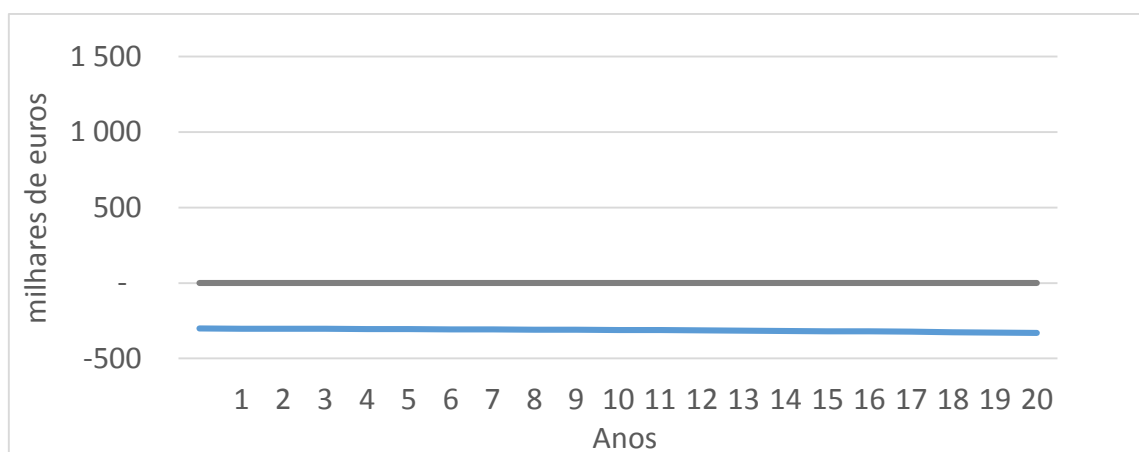


Figura 47 - Evolução temporal do retorno de investimento

Pela Figura 47, observa-se que no período de 20 anos não é atingido o retorno de investimento inicial para além da evolução ser ligeiramente negativa ao longo do tempo. O facto de não existir qualquer política de incentivo à produção de energia renovável, a tarifa reduzida de compra de eletricidade e a

taxa de juro expõem os fatores desfavoráveis para a implementação de projetos de aproveitamento de energias renováveis.

### 7.3 Comparação entre Portugal e Moçambique

A Figura 48 apresenta o peso de cada componente considerado no investimento dos dois projetos fotovoltaicos estudados.

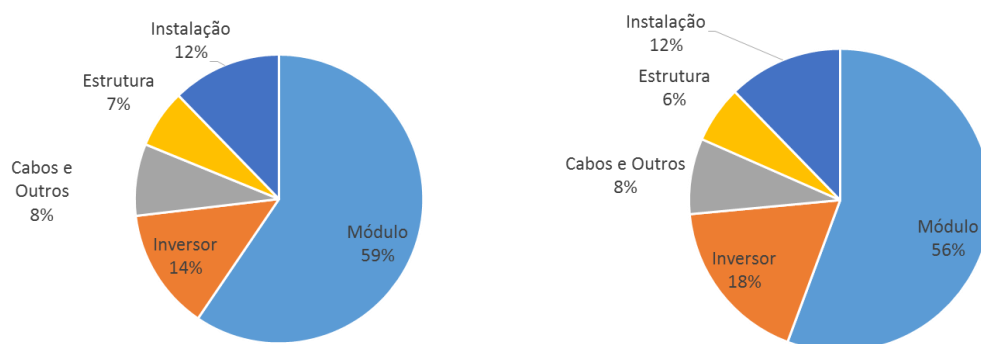


Figura 48 - Investimento do projeto fotovoltaico para Portugal (esquerda) e Moçambique (direita)

O investimento dos dois projetos não difere de forma significativa, sendo que os inversores apresentam 14% do investimento em Portugal e em Moçambique 18%. Este facto já era esperado uma vez que utilizaram-se os mesmos valores de preço para os dois projetos, de onde as variações se devem à configuração de inversores adotada para cada um.

Tabela 22 - Comparação dos principais valores entre casos de estudo

	Caso de Estudo 1 (Portugal)	Caso de Estudo 2 (Moçambique)
Área de Cobertura (m <sup>2</sup> )	9 650	5 400
Área disponível (m <sup>2</sup> )	4 000	2 070
	41%	38%
Área de módulo (m <sup>2</sup> )	1 800	1 360
	19%	25%
kWp	310	230
Wp/m <sup>2</sup>	78	111
Energia produzida (MWh ano)	410	330
kWh/kWp	1 320	1 435
Receita Anual (euros)	41 000	22 000
Investimento (euros)	370 000	304 000
Payback (anos)	11	--

Pela tabela verifica-se que a área do caso de estudo 1 é o dobro da área do caso de estudo 2. Apesar desta diferença em ambos os projetos, cerca de 40% da área está disponível para instalação de módulos fotovoltaicos. No entanto a área de captação solar implementada em Moçambique representa 25% enquanto em Portugal este valor é 6% inferior. Em Portugal cada unidade de área disponível tem um indicador de 78 Wp enquanto em Moçambique o mesmo metro quadrado constitui 111 Wp. Este aumento relaciona-se com a estrutura complanar adotada em Moçambique que permite maior aproveitamento da área disponível.

Apesar do investimento dos dois projetos deferir em 70 mil euros aproximadamente, o fator significativo para o retorno de investimento é a receita anual obtida que em Moçambique é 50% inferior. A par destes fatores, a falta de incentivos e o valor de venda de eletricidade baixo tornam a viabilidade financeira entre projetos acentuada, em que o caso de Portugal tem um retorno de investimento de 11 anos, caso o regime de autoconsumo seja adotado, e em Moçambique o projeto não é viável ao fim de 20 anos.



## 8 Conclusão

Numa sociedade em que a energia é um indicador de prosperidade e crescimento, a insustentabilidade da exploração energética requer novas formas de consumo e produção de energia. Nos edifícios, um dos setores de forte consumo energético, a simulação dinâmica é uma ferramenta utilizada para avaliar medidas de eficiência energética.

No caso de estudo da Ala Autónoma, a desagregação de consumos revelou que os maiores consumos acontecem na iluminação e na climatização. Na climatização 19% do consumo anual total é para ventiladores. As características do sistema de climatização, que associa a carga térmica a ventiladores de insuflação e extração permitiu definir um dos focos de ineficiência energética, juntamente com a iluminação. No âmbito da certificação energética, o edifício obteve uma classe B- (em que o indicador de eficiência energética previsto se encontra próximo do indicador em condições de referência)

Através da informação obtida pelo modelo de simulação foram avaliadas medidas de melhoria que em conjunto podem atingir uma redução de 40% da energia final anual, inserindo mudanças na área de iluminação, climatização e produção por módulos fotovoltaicos. Com a aplicação destas medidas de melhoria existe o potencial de atingir a classe A, que significa 50% do consumo anual do edifício em comparação com as condições de referência.

O planeamento de integração de energia fotovoltaica em edifícios apresenta-se como uma das soluções para responder às mudanças do sistema elétrico e das formas de consumo em ambiente urbano. As metodologias usadas para essa integração têm-se diversificado com o uso de modelos geométricos que apresentam uma disposição exata dos módulos como uma das opções com *software* intuitivo.

Foi estudado o potencial fotovoltaico para dois complexos universitários, em zonas geográficas diferentes. O estudo revelou que, para os dois casos de estudo, é possível utilizar cerca de 40% da área de cobertura para instalação de módulos fotovoltaicos.

As políticas de incentivo económico influenciam a viabilidade dos projetos de produção de energia renovável. O amadurecimento recente da tecnologia fotovoltaica provocou um desincentivo de tarifas bonificadas em Portugal. A nova legislação ambiciona o aumento de produção em autoconsumo. A análise feita neste trabalho permite concluir que este é o regime mais favorável, comparativamente ao regime de tarifa bonificada de 2014, com um retorno de investimento de 13 anos. Por outro lado a inexistência destas políticas em Moçambique e a baixa tarifa de venda de eletricidade leva a que a instalação de um sistema fotovoltaico seja inviável ao fim de 20 anos.

## 9 Referências

- Allan, G. et al., 2015. The economics of distributed energy generation: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, pp.543–556. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005164> [Accessed November 13, 2014].
- ALMA SOLAR, solar panels and solar inverter. Available at: <http://www.alma-solarshop.com/> [Accessed January 31, 2015].
- Ashrae, 2004. ASHRAE STANDARD Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae Standard*, 2004, p.34. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21785978>.
- ASHRAE Handbook - Fundamentals, 2009. Chapter 18 - Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations. *ASHRAE 2013*.
- Banco de Moçambique, 2015. Taxa de Juro de Facilidade Permanente de Cedência. Available at: <http://www.bancomoc.mz/> [Accessed February 23, 2015].
- Banco de Portugal e Banco Central Europeu, 2015. Taxas de juro bancárias - Empréstimos e depósitos. , (1), p.2015.
- Barbose, G. et al., 2012. Tracking US photovoltaic system prices 1998–2012: a rapidly changing market. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20, pp.6–11.
- Bergamasco, L. & Asinari, P., 2011. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy*, 85(5), pp.1041–1055. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.022>.
- Bing Maps, 2015. Bing Maps - Driving Directions, Traffic and Road Conditions. Available at: <http://www.bing.com/maps/> [Accessed February 11, 2015].
- Bisol Group, 2014. BISOL Premium Series BMU 245-265 Wp Data Sheet. , 1(Uni 9177).
- Branker, K., Pathak, M.J.M. & Pearce, J.M., 2011. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), pp.4470–4482. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111003492> [Accessed November 22, 2014].
- Carrilho da Graça, G., Martins, N.R. & Horta, C.S., 2012. Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall. *Energy and Buildings*, 50, pp.177–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812001855> [Accessed November 4, 2014].
- Celik, B. et al., 2015. Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications. , 75, pp.534–540.
- Cerón, I., Caamaño-Martín, E. & Neila, F.J., 2013. “State-of-the-art” of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, 58, pp.127–133. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.013>.
- Decreto de Lei 153/2014, 2014. Produção de Energia Distribuída. , pp.5298–5311.

- Dias, L. et al., 2014. Energy consumption in schools – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, pp.911–922. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010>.
- EnergyPlus, 2009. Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. , 2013. Available at: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf>.
- ERSE, 2014. *Tarifas e Preços para a Energia eléctrica e opotros Serviços em 2012: Parâmetros para p Período de Rugulação 2012-2014*,
- Freitas, S. et al., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.915–931. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>.
- Green, M., 2007. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.
- Ham, S.-W. et al., 2015. Simplified server model to simulate data center cooling energy consumption. *Energy and Buildings*, 86, pp.328–339. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814009049> [Accessed January 30, 2015].
- IEA, 2012. IEA Sankey Diagram. Available at: <http://www.iea.org/Sankey/> [Accessed January 15, 2015].
- IEA, 2013. *Transition to Sustainable Buildings*,
- International Renewable Energy Agency, 2012. RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES. *Green Energy and Technology*, 194(4), pp.145–172.
- IRENA, 2012. MOZAMBIQUE Renewables readiness assessment 2012. , p.76.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M. & Fueyo, N., 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 82(10), pp.929–939. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X08000625> [Accessed December 26, 2014].
- JRC's Institute for Energy and Transport and European Commission, PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System. Available at: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/about\\_pvgis/about\\_pvgis.htm](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/about_pvgis/about_pvgis.htm) [Accessed November 29, 2014].
- Karmellos, M., Kiprakis, A. & Mavrotas, G., 2015. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings : Model , software and case studies. *Applied Energy*, 139, pp.131–150. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.023>.
- LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, CLIMAS-SCE - Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios. Available at: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/> [Accessed January 31, 2015].
- Loulas, N.M. et al., 2012. Photovoltaics in urban environment: A case study for typical apartment buildings in Greece. *Renewable Energy*, 48, pp.453–463. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.009>.

- Ma, Z. et al., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, pp.889–902. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812004227> [Accessed July 10, 2014].
- Madlener, R. & Sunak, Y., 2011. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society*, 1(1), pp.45–53. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.006>.
- Masson, G., 2014. *A Snapshot of Global PV 1992-2013*,
- Mateus, N., 2012. Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização.
- Mateus, N.M., Pinto, A. & Graça, G.C. Da, 2014. Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy and Buildings*, 75, pp.511–522. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814001571> [Accessed December 4, 2014].
- Mondol, J.D., Yohanis, Y.G. & Norton, B., 2006. Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. *Solar Energy*, 80(12), pp.1517–1539. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06000600> [Accessed January 18, 2015].
- Nolte, I. & Strong, D., 2011. *Buildings Performance Institute Europe, Europe's buildings under the microscope*,
- Nunes, P., Lerer, M.M. & Carrilho Da Graça, G., 2013. Energy certification of existing office buildings: Analysis of two case studies and qualitative reflection. *Sustainable Cities and Society*, 9, pp.81–95.
- OECD/IEA, 2014. *Energy Efficiency Indicators : Fundamentals on Statistics*,
- OTIS, Gen2 Confort.
- Parlamento Europeu, 2010. Directiva 2010/31/UE. *Jornal Oficial da União Europeia*, pp.13–35.
- PremiumLight, Princípios básicos de iluminação. Available at: <http://www.premiumlight.eu/index.php?page=lighting-basics-9> [Accessed September 19, 2014].
- Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, 2013. P-349D -, (40), pp.40–73.
- Santos, T. et al., 2014. Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, pp.48–57. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.03.008>.
- Sekki, T., Airaksinen, M. & Saari, A., 2015. Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city. *Energy & Buildings*, 87, pp.105–115. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.032>.
- Sketchup Skelion solar design Plugin, Skelion Screenshots. Sketchup Skelion solar design plugin renewable energy. Available at: <http://skelion.com/en/screenshots.htm> [Accessed January 22, 2015].

- SMA Solar Technology, SMA Sunny Design Web. Available at:  
<http://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home> [Accessed February 22, 2015].
- Teixeira, L., 2013. Desempenho Energético de um Edifício de Ensino Modelação Gráfica , Simulação do Consumo e Estudo de Medidas de Eficiência Energética. , p.192.
- Thewes, A. et al., 2014. Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg. *Energy and Buildings*, 68, pp.460–470. Available at:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.002>.
- U.S. DOE, 2013. Getting Started with EnergyPlus (v 8.1).
- Wang, S., Yan, C. & Xiao, F., 2012. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*, 55, pp.873–888. Available at:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004410> [Accessed February 9, 2015].
- Zhao, H. & Magoulès, F., 2012. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), pp.3586–3592. Available at:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.

## 10 Anexos

### 10.1 Características da envolvente do edifício do campus ISCTE

#### 10.1.1 Paredes Exteriores

Tabela 23 - Características das paredes exteriores da Ala Autónoma

Parede Exterior Geral (PE-G1)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Pintura	0.01	1.55	2000	653	0.01
Betão Leve	0.15	0.21	750	1000	0.71
Ar 4cm não ventilado	0.04	0	1.2	0	0
Betão armado	0.2	2.27	2300	2100	0.09
<b>Espessura total</b>	<b>0.4</b>				
<b>Resistência total <math>R_{total}</math> (m².°C/W)</b>					<b>0.81</b>
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m².°C)</b>					<b>1.23</b>
Parede Exterior Auditórios (PE-A 45001)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Painéis de Contraplacado	0.01	0.16	625	0	0.06
Betão Leve	0.15	0.21	750	1000	0.71
Lã Mineral	0.04	0.042	61	840	0.95
Betão armado	0.2	2.27	2300	2100	0.09
<b>Espessura total</b>	<b>0.4</b>				
<b>Resistência total <math>R_{total}</math> (m².°C/W)</b>					<b>1.81</b>
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m².°C)</b>					<b>0.55</b>

#### 10.1.2 Paredes Interiores

Parede Interior Geral (PI-G1)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Pintura	0.01	1.55	2000	653	0.01
Betão Leve	0.2	0.21	750	1000	0.95
Pintura	0.01	1.55	2000	653	0.01
<b>Espessura total</b>	<b>0.22</b>				
<b>Resistência total <math>R_{total}</math> (m².°C/W)</b>					<b>0.97</b>

<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					1.03
Parede Interior Auditórios (PI-A1)					
<b>Descrição elemento (int → ext)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Condutividade (W/m.°C)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/kg.K)</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>
<b>Painéis de Contraplacado</b>	0.01	0.16	625	0	0.06
<b>Lã Mineral</b>	0.04	0.042	61	840	0.95
<b>Betão armado</b>	0.2	2.27	2300	2100	0.09
<b>Lã Mineral</b>	0.04	0.042	61	840	0.95
<b>Painéis de Contraplacado</b>	0.01	0.16	625	0	0.06
<b>Espessura total</b>	0.3				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					2.11
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					0.47
Parede Interior 1 (PI-Betão)					
<b>Descrição elemento (int → ext)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Condutividade (W/m.°C)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/kg.K)</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>
<b>Betão armado</b>	0.2	2.27	2300	2100	0.09
<b>Espessura total</b>	0.2				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					0.09
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					11.11
Parede Interior 2 (PI-324)					
<b>Descrição elemento (int → ext)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Condutividade (W/m.°C)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/kg.K)</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>
<b>Betão armado</b>	0.3	2.27	2300	2100	0.13
<b>Espessura total</b>	0.3				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					0.13
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					7.69

## 10.1.3 Pavimento e cobertura exteriores

Pavimento Exterior Geral (PAVExt-Geral)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Betão aligeirado	0.3	0.97	1525	0	0.31
Betonilha	0.05	1.35	1800	1000	0.04
Espessura total	0.35				
Resistência total $R_{total}$ (m².°C/W)					0.35
Coeficiente de Transmissão térmica total U (W/m².°C)					2.86

Pavimento Exterior Auditórios (PAVExt-Auditorios)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Régua Madeira	0.02	0.13	650	1000	0.15
Cortiça	0.02	0.065	400	1900	0.31
Betão armado	0.3	2.27	2300	2100	0.13
Espessura total	0.34				
Resistência total $R_{total}$ (m².°C/W)					0.59
Coeficiente de Transmissão térmica total U (W/m².°C)					1.69

Cobertura Exterior (COBExt-Geral)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m².°C/W)
Cortiça	0.02	0.065	400	1900	0.31
Betão armado	0.3	2.27	2300	2100	0.13
Polyplas	0.0025	0.235	1300	1920	0.01
Polyster	0.025	0.23	1100	1920	0.11
Poliestireno	0.003	0.035	35	1400	0.09
Espessura total	0.3505				
Resistência total $R_{total}$ (m².°C/W)					0.56
Coeficiente de Transmissão térmica total U (W/m².°C)					1.79



## 10.1.4 Pavimento e cobertura interiores

Pavimento Interior Geral (PAVInt-Geral)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
Linóleo	0.02	0.17	1200	1200	0.12
Betão aligeirado	0.15	0.48	1525	0	0.31
Cortiça	0.02	0.065	400	1900	0.31
<b>Espessura total</b>	0.19				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					0.74
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					1.35

Teto Interior Geral (TEInt-Geral)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
Cortiça	0.02	0.065	400	1900	0.31
Betão aligeirado	0.15	0.48	1525	0	0.31
Linóleo	0.02	0.17	1200	1200	0.12
<b>Espessura total</b>	0.19				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					0.74
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					1.35

Teto Interior Auditórios (TE-Auditorios)					
Descrição elemento (int → ext)	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
Painéis de contraplacado	0.01	0.16	625	0	0.06
Caixa-de-ar	0.5	0	0	0	0
Lã mineral	0.02	0.042	61	840	0.48
betão aligeirado	0.15	0.48	1525	0	0.31
<b>Espessura total</b>	0.68				
<b>Resistência total R<sub>total</sub> (m<sup>2</sup>.°C/W)</b>					0.85
<b>Coefficiente de Transmissão térmica total U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>					1.18

## 10.2 Perdas do sistema fotovoltaico considerado

As perdas do sistema fotovoltaico foram calculados pela equação 14.

$$Perdas_{sist\,m\acute{e}s} = 1 - \frac{Produ\c{c}\tilde{a}o_{Real}}{E_{PV}} \quad [1]$$

Em que  $Produ\c{c}\tilde{a}o_{Real}$ , são dados de produção do sistema fotovoltaico instalado (usaram-se dois casos de estudo da UL – Cantina 1 e Jardim de Pedra do C7),  $E_{PV}$ , é a energia produzida segundo a equação 2. Nesta equação,  $I_{PVGIS\,mensal}$ , representa a irradiação solar mensal que chega a uma superfície ( $Wh/m^2$ )  $A_c$ , área de captação do módulo considerado ( $m^2$ ),  $\eta_{m\acute{o}dulo}$ , eficiência do módulo considerado (%), nesta caso 15%. Os resultados para a Cantina I e Jardim de Pedra do C/ são apresentados na Figura 49 e Figura 50, respetivamente.

$$E_{sistema\,PV} = I_{PVGIS\,mensal} \times A_c \times \eta_{m\acute{o}dulo} \quad [2]$$

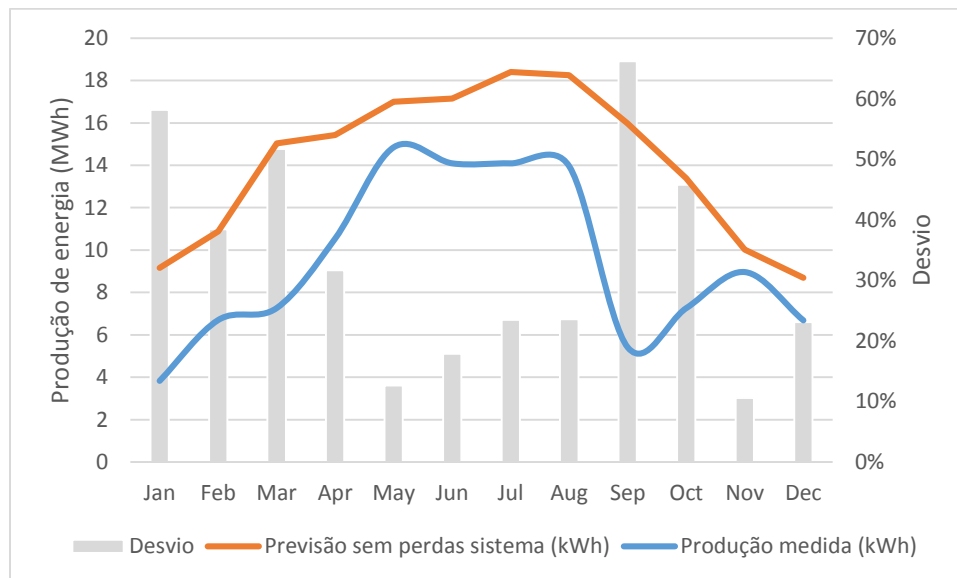


Figura 49 - Produção real e prevista para cantina 1 da UL

Os dados de medição referentes ao mês de Julho não foram disponibilizados pelo que considerou-se que a produção de energia igual ao mês de Junho. A nível anual existe uma diferença de cerca de 30%. A plataforma *PVGIS* também considera um valor semelhante pelo que se considerou este valor razoável.

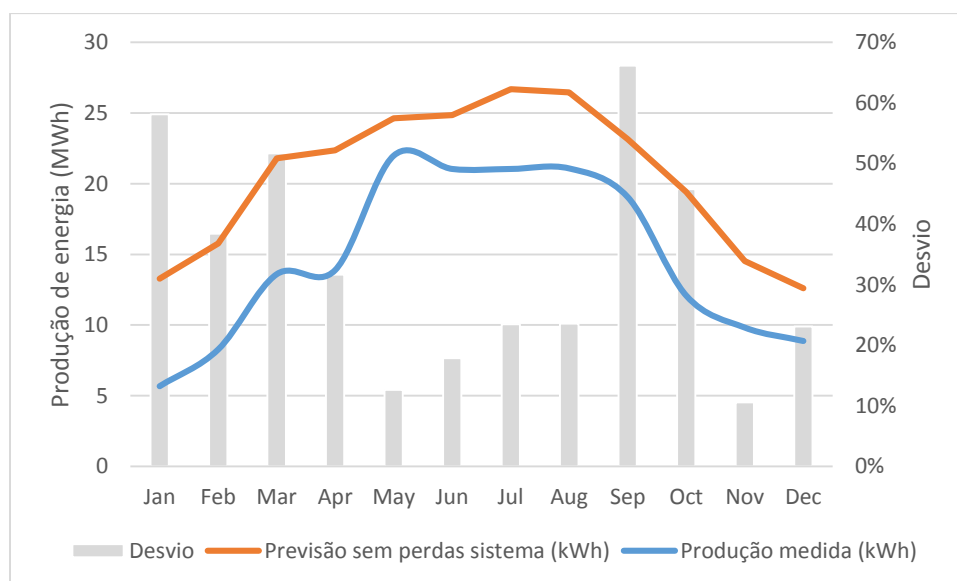


Figura 50 - Produção real e prevista para Jardim de Pedra da FCUL

### 10.3 Configuração do sistema fotovoltaico (Portugal e Moçambique)

Na Tabela 24 apresentam-se as características do módulo fotovoltaico utilizado nos casos de estudo apresentados, retirados da respetiva ficha técnica.

Tabela 24 - Características do módulo utilizado

Módulo	BISOL Premium BMU-250
I MPP	8.15
V MPP	30.3
Isc	8.75
Vsc	38.4

A partir destes valores organizaram-se os painéis em série (*string*) e paralelo e verificou-se a sua compatibilidade com as características nominais de entrada do inversor, nomeadamente, corrente máxima e tensão máxima. Verificou-se também qual o quociente entre a potência do inversor e a potência dos módulos associados a esse inversor. Obtiveram-se valores entre 0.9 e 1.1. Este valor é indicador do desempenho do inversor face à energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Um quociente muito inferior a 1 indica que a produção dos módulos não vai ser completamente absorvida e transferida para a rede pelo inversor uma vez que este não tem capacidade para tal. O contrário indica que o inversor funciona fora dos níveis ótimos de eficiência uma vez que opera a uma potência muito inferior para a qual foi concebido. Segundo a equipa de Mondol (Mondol et al. 2006) para inversores de alta eficiência variações entre 0.6 e 1.3 não afetam a eficiência do inversor de forma significativa (tem variações de 1% face ao valor máximo de eficiência).

Tabela 25 - Caracterização do sistema fotovoltaico para o *campus* ISCTE em Portugal

Edifício	Módulos					Inversor				$P_{PV}/P_{inv}$
	Módulos por string	Qtd. String	$I_{MPP}$	$V_{MP}$ P	$P_{STC}$	$I_{maxDC}$	$V_{maxD}$ C	$P_{inv}$	Qtd	
AA	22	3	24.5	667	16 298	33	1000	1700	1	1.10
	10	1	8.2	303	2 469	11		0		
INDEG	22	3	24.5	667	16 298	33	1000	1700	1	1.05
	6	1	8.2	182	1 482	11		0		
	21	2	16.3	636	10 372	17.5	1000	1200	1	1.01
	7	1	8.2	212	1 729	17.5		0		
ED. I	22	1	8.2	667	5 433	32	845	1000	2	1.06
	21	1	8.2	636	5 186			0		
	21	2	16.3	636	10 372	33	1000	1700	5	0.90
	20	1	8.2	606	4 939	11		0		
	23	2	16.3	697	11 359	33	1000	1700	5	1.02
	24	1	8.2	727	5 927	11		0		
ED. II	22	2	16.3	667	10 866	48	1000	1500	2	1.09
	22	1	8.2	667	5 433			0		
	22	2	16.3	667	10 866	32	845	1000	1	1.09
								0		
	21	2	16.3	636	10 372	48	1000	1200	2	1.01
	7	1	8.2	212	1 729			0		

Os valores de distribuição de *strings* foram obtidos a partir de *Sunny Design Web* (SMA Solar Technology n.d.). Os valores característicos dos inversores foram obtidos através das fichas técnicas respetivas. Como se pode observar pela Tabela 25, os valores máximos de entrada do inversor não são ultrapassados pela configuração apresentada, tanto de corrente como de tensão.

Procedeu-se de modo semelhante para o caso de estudo em Moçambique (Tabela 26).

Tabela 26 - Caracterização do sistema fotovoltaico para o *campus* em Moçambique

Edifício	Módulos					Inversor				$P_{PV}/P_{inv}$
	Módulos por string	Qtd. String	$I_{MPP}$	$V_{MP}$ P	$P_{STC}$	$I_{maxDC}$	$V_{maxD}$ C	$P_{inv}$	Qtd	
Reitoria	22	2	16.3	667	10 866	48	1000	1500	2	0.99
	16	1	8.2	485	3 951			0		
	23	2	16.3	697	11 359	33	1000	1700	4	0.99
	22	1	8.2	667	5 433	11		0		
Serviços Centrais	20	2	16.3	606	9 878	32	845	1000	2	0.99
								0		
	22	2	16.3	667	10 866	48	1000	1500	2	1.07
	21	1	8.2	636	5 186			0		
Complexo Salas de Aula	22	2	16.3	667	10 866	33	1000	1700	5	0.96
	22	1	8.2	667	5 433	11		0		